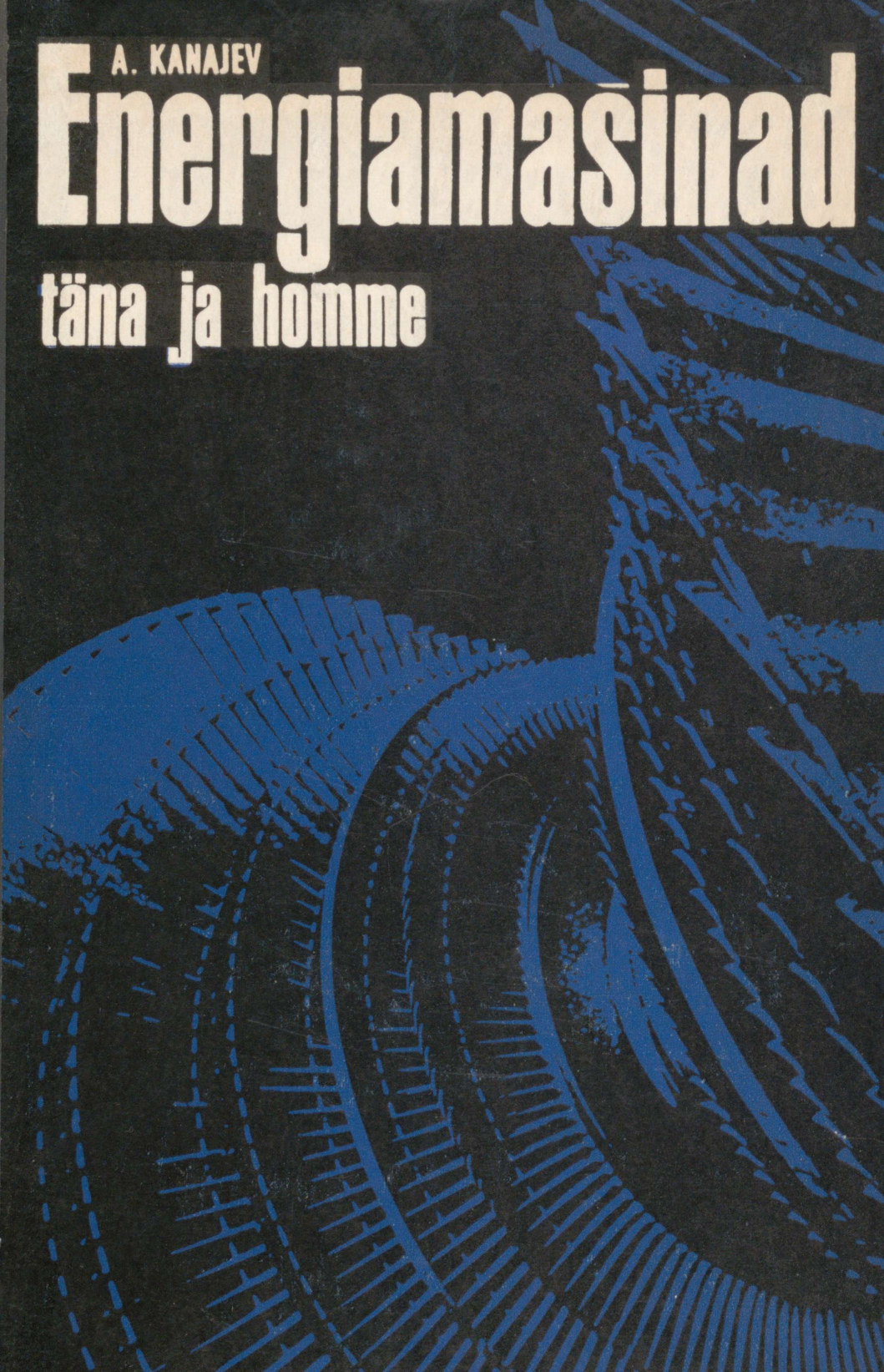


A. KANAJEV

Energiamasinad

täna ja homme



A-29769

A. A. KANAJEV

ENERGIAMASINAD TÄNA JA HOMME

KIRJASTUS «VALGUS»

TALLINN 1970

6T2

Kaane kujundanud T. Aru

K15

Originaali tiitel:

A. A. Канаев

Энергетические машины настоящего и будущего
«Машиностроение», Ленинград 1967

Tõlkinud vene keelest I. Mikk

УДК 621.62-8

Энергетические машины настоящего и будущего

A. Канаев

1970

В книге излагаются основные направления технического развития энергетического машиностроения. Рассматриваются схемы и конструкции всех видов энергетических машин. Разбираются конструкции энергетического оборудования для использования ветра, солнца, геотермической, ядерной и термоядерной энергии. Книга предназначена для широкого круга читателей.

76 илл. 2 табл. 43 назв. библ.

Raamatus esitatakse energiamasinaehituse arengu põhisuunad. Kirjeldatakse iga liiki energiamasinaid ja -agregaatide (gaasi-, auru- ja hüdroturbiine, auru-gaasiagregaatide), samuti seadmeid tuule, päikese, maasisese, tuuma- ja termotuumaenergia kasutamiseks. Selgitatakse ka võimalusi soojuse vahetuse muundamiseks elektrienergiaks.

Teos on mõeldud laiale lugejaskonnale, keda huvitavad energiamasinaehituse küsimused.

Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu

TARTU ÜLKOOLI

RAAMATUKOGU

A. A. Канаев. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МАШИНЫ НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО. На эстонском языке. Издательство «Валгус». Таллин, Пярнуское шоссе, 10.

Toimetaja L. Abo. Kunstiline toimetaja R. Tungla. Tehniline toimetaja E. Toomalu. Korrektorid M. Maide ja A. Lember.

Laduda antud 2. X 1969. Trükkida antud 16. I 1970. Kohila Paberivabriku trükipaber nr. 2, 60×90/16. Trükipoognaid 9,5. Arvestuspoognaid 9,79. Tellimuse nr. 6691. Trükiarv 2000. Trükikoda «Kommunist», Tallinn, Pikk t. 2. Hind 59 kop.

EESSÕNA

Käesolevas raamatus tutvustatakse lugejaid tuleviku energeetiliste masinate arengu tehniliste suundade ja perspektiividega. Vaadeldakse mitmesuguseid uusi energiamasinate ja agregaatide tüüpe. Näidatakse tuleviku, tänapäeva ja mineviku masinate konstruktsioonide ja soojusskeemide ajaloolist järgnevust. Näiteks kasutati möödunud sajandi keskel aurumasinates madala keemistemperatuuriga vedelike aure. 100 aastat hiljem tuleb uuesti pöörduda selle idee juurde, et luua hiiglaslikke ühevõllilisi turbiine võimsusega 1—2 milj. kW.

Juba XVII sajandil konstrueeriti rootorkolviga auru- ja sise-põlemismootoreid. Tänapäeval luuakse seda tüüpi mootoreid, mis oma näitajatelt ületavad tavalised kolbmootorid. Säärast ajalooliste ideede kordumist võib jälgida ka termoelektriliste ja keemiliste elektrigeneraatorite ning teiste energiamasinate konstruktsioonide kujunemisel.

Igas käesoleva raamatu peatükis on vaadeldud vastavate energeetiseadmete minevikku, kaasaega ja tulevikku.

Viimase kahekümne aasta vältel toimub kõigis maailma maades kiire energeetiliste võimsuste ja elektrienergia tootmise kasv. Ent kõigis maades ei ole piisavalt kütusereserve energeetika edasiarendamiseks. Seetõttu teravneb pidevalt orgaanilise kütuse (süsi, nafta, gaas) osatähtsuse vähendamise probleem. Energeetikute tähtsaimaks ja kiireimaks ülesandeks on ka uute energiavarude kasutuselevõtmine (tuuma- ja termotuumakütus, maasisene soojus, mere energia, tuule energia, päikese energia). Sellest, kuidas lahendatakse neid väga tähtsaid ülesandeid, jutustataksegi käesolevas raamatus.

Raamat on mõeldud laiale lugejaskonnale (keskkoolide ja kutsekoolide õpilastele, elektri- ja energiasektori töötajatele ja energiasektori töötajatele). Mõned osad võivad huvi pakkuda ka kõrgemates õppeasutustes ja tehnikumides õppijatele ning inseneritehniliste töötajatele. Materjali esitusel on eeldatud lugeja üldhariduslikku ettevalmistust keskkoolikursuse ulatuses.

SISSEJUHATUS

Tööstuse, transpordi, põllumajanduse ja teiste rahvamajandusharude areng on seotud energia tarbimise kasvuga, eeskätt aga elektrienergia tarbimise kasvuga. Energiaga varustus on maa majandusliku potentsiaali tähtsaimaks iseloomustajaks.

Maailmas tarbiti 1860. aastal 555,5 milj. t tingkütust (kütteväärtusega 7000 kcal/kg) ehk 0,46 t ühe inimese kohta. Aastaks 1960 aga suurenes tarbimine 4320 milj. tonnini ehk 1,65 t inimese kohta.

Maailma üldises energiatootmises langes 1960. aastal kivisöe arvele 44%, nafta arvele umbes 27%, loodusliku gaasi arvele umbes 12%, hüdroenergia arvele 6%, puidu ja põllumajandus- tootmise jääkidele 11%. 1856. aastal moodustas puidu osa energia- varudest umbes 90% ja kivisöe osa ainult 8%. Indias saadi veel 1953. aastal kuni 75% energiast sõnniku põletamise arvel. Maailma energiabilansi struktuuri muutumist sajandi vältel iseloomustab tabel 1.

Energiavarude osa, mida kasutatakse elektrienergia tootmiseks, nimetatakse energiabilansi elektrifitseerimise teguriks. See tegur kasvas 6%-lt 1920. aastal 23%-ni 1960. aastal. Eri maades on ta väärtus erinev. NSVL-s oli ta väärtus 1962. aastal 22,7%. Maailma energiabilansi elektrifitseerimise teguri loodetav väärtus aastaks 1975 on 30%.

Maailma elektrienergia toodang kasvas 15 miljardilt kWh 1900. aastal 2231 miljardi kWh-ni 1960. aastal, elektrienergia toodang elaniku kohta kogu maailmas aga kasvas vastavalt 9-lt kuni 750 kWh-ni aastas. Erinevates maades kõigub see suurus laiades piirides. 1960. aastal oli ta USA-s — 4310 kWh, Inglismaal — 2242, Saksa FV-s — 1960, Prantsusmaal — 1436, Türgis — 100, Indias 49, Nigeerias — 2. 1965. aastal ületas maailma elektrienergia toodang 3000 miljardi kWh.

Kivisütt toodeti sel perioodil 1972,2 milj. t, ligniiti 650 milj. t, naftat 1052,8 milj. t. Loodusliku gaasi toodang oli 450 miljardit m³. Maailma potentsiaalsed energiavarud on väljendatud tabelis 2 toodud arvudes.

Elektrienergia tootmise kasv nõuab elektrijaamade võimsuse

Tabel 1
Maailma energiabilansi
tulude poole struktuur perioo-
dil 1860—1960

Energiavarude liigid	1860	
	milj. t. ting- kütust	%
Kivisüsi	137	24,7
Nafta	0,1	—
Gaas	4,9	0,9
Puit	317	57,1
Põllumajandusliku tootmise jäägid	92,5	16,6
Hüdroenergia	4	0,7
Kokku	555,5	100

suurendamist ja samuti ka energiaagregaatide üksikvõimsuste suurendamist. Aastatei 1920 kuni 1960 suurenes elektriyaamade installeeritud võimsus kogu maailmas 30-lt kuni 530 milj. kW-ni.

Elektriyaamad ei ole ainsateks energiaseadmete esindajateks. On olemas suur veo- ja sõiduautode, autobusside, traktorite, buldoosrite, lokomotiivide, mere- ja jõelaevade ja lennukite park. Nõukogude Liidus kulutati transpordis 1958. aastal umbes 31% maa naftatoodangust ja 21% kivisõetoodangust. USA-s tarbib transport 20% kogu energiatoodangust, sealhulgas umbes 50% kogu naftatoodangust. Mootorite võimsus, mis käitasid töomasinaid mitmesugustes tööstusharudes, oli 1956. a. Nõukogude Liidus 6,3 milj. kW. Põllumajanduses kasutatavate mootorite võimsus oli 119 milj. hj, sealhulgas traktorimootorite võimsus 39 milj. hj, autodel 50 milj. hj, kombainidel 21 milj. hj. Magistraalmootor- ja auruedurite võimsus oli mitu miljonit hobujõudu.

Venemaa elektriyaamade installeeritud võimsus oli 1913. a. umbes 1 milj. kW, millest üldkasutatavate elektriyaamade arvele langes 260 000 kW ja tehaste elektriyaamade arvele 750 000 kW. Põllumajanduses oli üldse 100 elektriyaama üldvõimsusega 2700 kW. Elektrienergia tarbimine elaniku kohta oli 8 kWh aastas 236 kWh vastu USA-s.

GOELRO plaaniga nähti ette ehitada 10—15 aasta vältel 30, tolle aja kohta suurt rajoonielektriyaama, sealhulgas 20 soojus- ja 10 hüdrojaama üldvõimsusega 1,75 milj. kW.

1940. aastaks kasvas rajoonielektriyaamade võimsus kuni 10,7 milj. kW-ni, ületades 1913. a. taseme 11-kordselt. Elektrienergia tootmine kasvas 48 miljardi kWh-ni, mis ületas 1913. a. taseme 30-kordselt.

Suure Isamaasõja aastatel kannatas purustuste ja vigastuste all üle 60 suure elektriyaama ja installeeritud võimsus vähenes 5 milj. kW võrra. 1950. a. lõpuks õnnestus viia elektriyaamade installeeritud võimsus uuesti 19,6 milj. kW-ni ja elektrienergia

1900		1920		1940		1960	
milj. t ting- kütust	%	milj. t ting- kütust	%	milj. t ting- kütust	%	milj. t ting- kütust	%
767	57,3	1340	62,2	1880	57,6	2141	44,4
31,2	2,3	144	6,7	450	13,8	1299	26,9
12,1	0,9	30,4	1,4	118	3,6	567	11,7
296	22,2	250	11,6	177	5,4	150	3,1
222	16,6	353	16,4	527	16,1	550	11,4
9	0,7	38	1,7	115	3,5	317	6,5
1337,3	100	2155,4	100	3267	100	4830	100

toodang tõsta 91,2 miljardi kWh-ni. Aastaks 1955 suurenes elektri- jaamad installeeritud võimsus 37,2 milj. kW-ni elektrienergia toodangu juures 170,2 miljardi kWh ja 1960. a. lõpuks vastavalt 66,7 milj. kW-ni ja 292,3 miljardi kWh-ni. 1965. aastal saavutas elektrienergia toodang NSVL-s 507 miljardit kWh. Elektrienergia toodangu mahult on NSV Liit juba ammu ületanud kõik Euroopa maad.

NLKP XXIII kongressi direktiivides on ette nähtud suurendada elektrienergia toodang 1970. aastaks 830—850 miljardi kWh-ni.

NLKP programmis on elektrifitseerimise tähtsus kaasajal, kommunismi materiaal-tehnilise baasi loomisel sõnastatud järgmiselt: «Elektrifitseerimine, olles kommunistliku ühiskonna majanduse ülesehituse aluseks, on määrava tähtsusega kõigi rahvamajandusharude arengus ja kogu kaasaegse tehnilise progressi saavutamisel».

Uute energeetiliste võimsuste käikulaskmine toimub eeskätt suurte soojuselektrijaamade ehitamise arvel, kuid samuti ka suurte hüdrojaamade ehitamise teel. Seejuures umbes 80% kogu elektrienergia toodangust saadakse soojuselektrijaamadest, mis nõuab kütuse tootmise märgatavat laiendamist.

Uutele energiaagregaatidele esitatavaks tähtsaimaks nõudeks on ühtlasi ka kütuse erikulu vähendamine.

Venemaa elektrijaamades oli 1913. a. kütuse erikulu 1060 g/kWh. Aastaks 1928 vähenes see väärtuseni 820 g/kWh, 1960. aastaks — 468 g/kWh ja 1965. aastaks — 413 g/kWh. Energiamasinate ehitajad ja energeetikud püüavad saavutada edasist kütuse erikulu vähendamist elektrijaamades väärtusteni 350 — 300 g/kWh. Ent ka säärase kütuse erikulu vähendamise korral nõuab elektrienergia tootmise kasv märgatavat kütuse kulu suurendamist elektrijaamades.

NSVL omab mitmesuguste kütuste suuri varusid. Maailma varudest tuleb meie maa arvele üle 54% kaevandatavast kivisöest

Maailma potentsiaalsed energiavarud

Varude liigid	Potentsiaalsed varud maailmas		1952. a. kasutatud energiavarud	
	miljardit kWh	%	miljardit kWh	%
Taastuvad varud				
Päikese kiirgusenergia	620 000 000	51,9	—	—
Tuuleenergia	460 000	—	—	—
Hüdroenergia	32 900	0,1	400	1,4
Puit ja taimeline kütus	104 700	—	4 600	16,0
Töötavad koduloomad	100	—	100	0,3
Kokku taastuvaid varusid	620 597 700	52	5 100	17,7
Mittetaastuvad varud				
Tuumakütus	515 000 000	43,1	—	—
Mineraalne kütus	58 850 000	4,9	23 700	82,3
Kokku mittetaastuvaid varusid	573 850 000	48,0	27 000	82,3
Uldse energiavarusid	1 194 447 700	100	28 800	100

Märkus. Tabelisse pole võetud geotermilist energiat, tõusu- ja mõõnaenergiat, lainete energiat, atmosfäärielektrit ja energiat temperatuuride erinevuse arvel vee ja õhukihtide vahel.

ja üle 43% põlevkivist. Nafta- ja loodusliku gaasi varude poolest on NSV Liit maailmas esikohal.

Kuuendal ülemaailmsel energieetika konverentsil (Melbourne, 1962. a.) on K. D. Lavrenenko ettekandes toodud järgmised näitajad NSV Liidu energiavarude kohta: kivisöevarud — $8,7 \cdot 10^{18}$ t, looduslik gaas — $10 \cdot 10^{18}$ m³, hüdroressursid — $2,1 \cdot 10^{18}$ miljardit kWh. Need hiiglaslikud energiavarud tagavad maa energieetika arengu paljudeks sajanditeks.

I peatükk

AURUTURBIIN-ELEKTRIJAAAMADE SISSESEADE

1. AURUTURBIINI EHTITUSE JA TÖÖTAMISE PÕHIMÕTTED

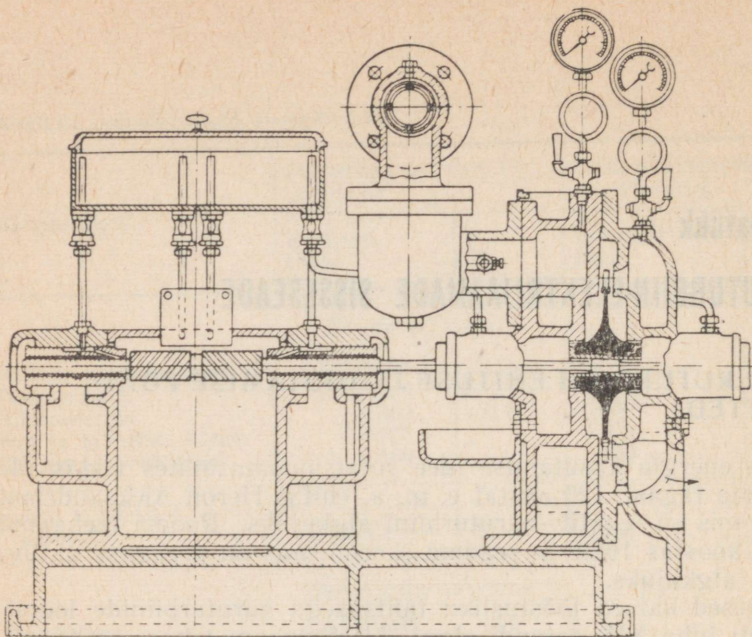
Auru energia kasutamise idee rotatsioonmasinates tekkis üle 2000 aasta tagasi. 120 aastat e. m. a. ehitas Heron Aleksandriast seadme, mis on reaktiiv-auruturbiini algkujuks. Rooma mehaanik Bramca koostas 1629. a. seadme skeemi, mis on praeguse aktiiv-turbiini algkujuks.

Esimesed katsed tööstusliku tähtsusega auruturbiinide loomiseks tehti juba XIX sajandi algul. Altai Suzuni tehase mehaanik P. M. Zalessov töötas 1806. a. välja aktiiv-auruturbiini konstruktsiooni. Oma ettekandes 3. aprillist 1807. a. teatas Zalessov, et turbiin on ehitatud ja töötab. Samaaegselt ta teatas, et on alustanud võimsama auruturbiini valmistamist. Auruturbiini loomisega tegelesid ka J. A. Tšerepanov ja M. J. Tšerepanov, kes ehitasid 1834. a. esimese vene veduri.

XIX saj. 30-ndatel aastatel ehitati USA-s üheastmelisi reaktiivturbiine kiirekäiguliste masinate käitamiseks (ketassaed jne.). 20—30 aasta pärast ehitati taolisi turbiine ka Inglismaal. Peterburis katsetas V. P. Titov oma konstrueeritud reaktiivturbiini aastatel 1856—1857.

XIX saj. lõpul võimaldas termodünaamika ja gaasidünaamika areng luua auruturbiinide arvutuse teooria alused. Sel perioodil ilmusid ka nende masinate esimesed tööstuslikud mudelid, mis olid projekteeritud juba vastavuses soojuslikkude protsesside teooria nõuetega. Aastal 1883 sai üheastmelise aktiivturbiini patendi Laval (Rootsi). Sääraseid turbiine võimsusega 200—400 kW ehitati reas maades. Nende ökonoomsus oli väike ja reduktori kasutamise vajadus muutis konstruktsiooni keeruliseks.

Joonisel 1 on kujutatud Lavali üheastmeline aktiivturbiin. Paremal on turbiini võllile kinnitatud töölabadega ketas. Paigalseisvates düüsidest muudetakse kogu auru potentsiaalne energia kineetiliseks. Aur paisub düüsidest ja saavutab suure kiiruse, millega väljub töölabadele. Liikudes töölabadevahelistes kõverates kanalites, muudab auru vool oma liikumise suunda ja selle tulemusel tekib jõud, mis paneb pöörlema turbiini rootori. Säärast



Joon. 1. Laval'i auruturbiin võimsusega 30 hj.

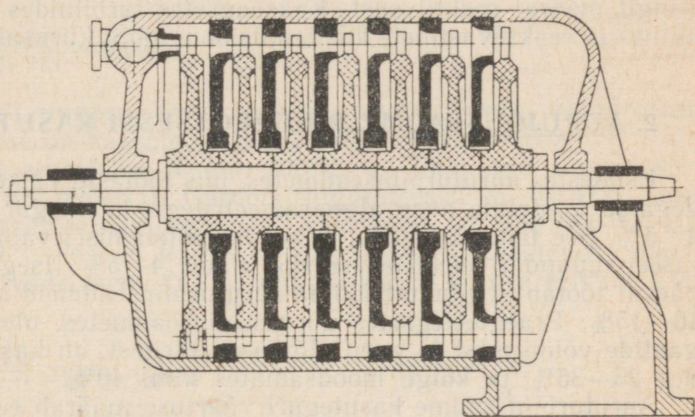
turbiini astet, milles auru paisumine (potentsiaalse energia muundumine kineetiliseks) toimub ainult paigalseisvate labade vahel (düüsid), nimetatakse aktiivastmeks.

Turbiini astme suurim kasutegur saavutatakse labade teatava kindla pöörlemiskiiruse ja auru düüsi väljumise kiiruse suhte juures. Laval'i turbiinis, kus auru paisumine toimub ühe astme düüsid, on auru väljumiskiirus suur. Seetõttu labade optimaalne pöörlemiskiirus (ringkiirus) peab olema samuti suur ja turbiini rootori pöörlemiskiirus on 30 000 p/min piirides. Niis suure pöörde arvu juures on ketta tugevuse seisukohalt suure võimsusega turbiini konstruktsioon raskesti realiseeritav. Tavaliselt ei ületa Laval'i turbiini võimsus 300—400 kW piire. Suure pöörlemiskiiruse tõttu ühendatakse Laval'i turbiin elektrigeneraatoriga (mille nõutav pöörlemiskiirus on 3000 p/min) hammasreduktoriga.

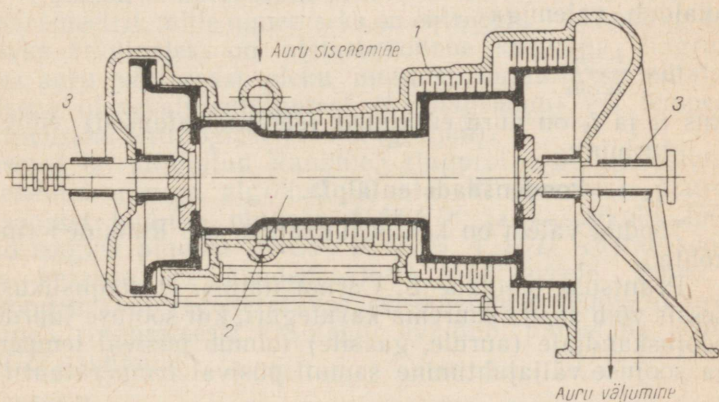
Insener Curtis (USA) töötas välja aktiivturbiini konstruktsiooni, mille ketta serval paikneb 2—3 rida töölabasid ja staatorile on paigutatud 1—2 rida paigalseisvaid juhtlabasid. Sel juhul kasutatakse ära auru kineetiline energia järk-järgult kahes-kolmes töölabade reas, kusjuures juhtlabad annavad auru voolule vajaliku suuna sisenemisel järgmiste töölabade ritta. Sääraseid kahe- või kolmerealisi turbiine, milles auru kiiruse kasutamine toimub mitmes astmes (töölabade reas), nimetatakse kiirusastmetega turbiini-

nideks. Kahe- ja kolmerealistes ketastes paranevad auru kinetilisest energia kasutamise tingimused, mistõttu kõrgema kasuteguri väärtuse võib saavutada väiksema ringkiiruse ja auru kiiruse suhte juures, s. t. väiksema pöörlemiskiiruse juures kui Lavali turbiinis. Kaherealised kettad leiavad kasutamist ka kaasaegsetes suure võimsusega turbiinides nn. reguleerimisastmetena.

Läinud sajandi lõpul töötas Rato (Prantsusmaa) välja mitme rõhuastmega aktiivturbiini konstruktsiooni. Säärastes turbiinides muudetakse auru potentsiaalset energia kinetiliseks mitte ühe, vaid mitme astme düüsid. Selliste turbiinide konstruktsiooni täiustas Zelly (Šveits), mistõttu neid nimetatakse Rato-Zelly turbiinideks (joon. 2).



Joon. 2. Mitmeastmeline aktiivne auruturbiin.



Joon. 3. Parsonsi reaktiivturbiin: 1 — korpus; 2 — rootori trummel; 3 — laager.

1884. a. anti patent Parsonsile (Inglismaa), kes konstrueeris ja ehitas reaktiivturbiini. Reaktiivturbiinis paisub aur nii paigalseisvatel juhtlabadel kui ka liikuvatel töölabadel. Töölabad paiknevad mitte üksikutel ketastel, vaid trumlitaolisel rootoril (joon. 3), sest astmete arv on suur ja juhtlabade ning töölabade laiused väikesed. Töölabadele mõjub jõud, mis on põhjustatud auru voolu suuna muutusest, ja samuti reaktiivjõud, mis tekib auru kiiruse suurenemisest labadevahelistes kanalites auru paisumise tagajärjel. Seega on reaktiivturbiinis auru paisumine jagatud juhtlabadele kui ka töölabadele.

Aktiiv- ja reaktiivastme mõisted on tinglikud. Voolamise tingimused turbiini laba ristlõikes on laba kõrguse suunas muutlikud. Laba teatav osa võib töötada aktiivselt, teine osa aga võib omada mingil määral reaktiivsust. Kaasaegsetes turbiinides kasutatakse aktiiv- ja reaktiivastmete kombinatsioone ning kiirusastmeid.

2. AURUJÕUSEADME RINGPROTSESSI KASUTEGUR

Esimestes auruturbiiniseadmetes, mis töötasid väikeste turbiinidega ja madalate auru algparameetritega, kasutegur ei ületanud 4—5%. See tähendab seda, et kütuse põletamisel vabanevast soojusest muundati elektrienergiaks ainult 4—5%. Isegi veel tänapäeval töötab eksploatatsioonis auruturbiiniseadmeid kasuteguriga 10—15%. Praegusaegsetes auruturbiiniseadmetes, olenevalt agregaatide võimsusest ja auru algparameetritest, on kasutegur piirides 25—35% ja kõige moodsamates kuni 40%.

Auruturbiiniseadme kasuteguri väärtuse määrab eelkõige ringprotsessi termiline kasutegur, s. t. teoreetiliselt võimalik osa auru soojusest, mida on võimalik muundada kasulikuks tööks, kui puuduvad energiakaod turbiinis. Selline termiline kasutegur avaldub valemiga

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - q_k},$$

kus i_1 ja i_2 on auru entalpiad (soojussisaldused) enne ja pärast turbiini;

q_k — kondensaadi entalpia.

Toodud valem on kehtiv lihtsaima, nn. Rankine'i ringprotsessi kohta.

Prantsuse teadlane S. Carnot näitas, et soojuslikus ringprotsessis võib saada suurema kasuteguri, kui soojuse juurdejuhtimine soojuskandjale (aurule, gaasile) toimub püsival temperatuuril T_1 ja soojuse väljajuhtimine samuti püsival temperatuuril T_2 :

$$\eta_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Toodud avaldises on temperatuurid antud absoluutse skaala järgi ($T \text{ } ^\circ\text{K} = t \text{ } ^\circ\text{C} + 273$). Carnot' ringprotsess on ideaalne ja kõikide reaalsete soojusmootorite ringprotsesside (auruturbiin, gaasiturbiin, sise põlemismootor) kasutegur on alati madalam Carnot' ringprotsessi kasutegurist, sest ei osutu võimalikuks tagada soojuse juurde- ja väljajuhtimist püsivatel temperatuuridel. Auru temperatuuri juures $500 \text{ } ^\circ\text{C}$ (rõhk 90 ata) ja kondensaadi temperatuuril $28,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ (0,04 ata) on Rankine'i ringprotsessi kasutegur

$$\eta_t = \frac{810 - 481}{810 - 28,6} = 0,422;$$

samade temperatuuride puhul Carnot' ringprotsessi kasutegur

$$\eta_c = \frac{500 - 28,6}{500 - 273} = 0,608.$$

Rankine'i ringprotsessi kasuteguri suhe Carnot' ringprotsessi kasutegurisse on käesoleval juhul $0,422 : 0,608 = 0,693$.

Auru parameetritel 10 ata, $300 \text{ } ^\circ\text{C}$ on Rankine'i ringprotsessi kasutegur $\eta_t = 0,309$ ja Carnot' ringprotsessil $\eta_c = 0,473$. Seega auru algparameetrite tõstmisel väärtuselt 10 ata, $300 \text{ } ^\circ\text{C}$ kuni 90 ata, $500 \text{ } ^\circ\text{C}$ kasvab Rankine'i ringprotsessi kasutegur väärtuselt 30,9% väärtuseni 42,2%, mis tähendab kütuse erikulu vähenemist

$$\frac{0,422 - 0,309}{0,422} = 26\% \text{ võrra.}$$

Soojuslike protsesside, sealhulgas ringprotsesside termodünaamilisel analüüsimisel kasutatakse gaasi või auru olekuparameetreid — rõhku, temperatuuri, erimahtu, entalpiat. Kasutatakse ka olekuparameetrit, mille nimetuseks on entroopia — s kcal/kg-deg. Soojuslikeks arvutusteks on otstarbekohane kasutada diagramme, milles auru või gaasi oleku muutust kujutatakse entalpia muutumisena olenevalt entroopiast (i - s -diagramm) või temperatuuri sõltuvusena entroopiast (T - s -diagramm).

Joonisel 4 on kujutatud Rankine'i ringprotsessid küllastunud ülekuumenenud auruga algrõhul 90 ata. Ringprotsessi juurdejuhitud soojust kujutab pindala $A'ABCD'$ ja kasulikuks tööks muudetud soojust pindala $ABCD$. Pindala $A'ADD'$ vastab soojusele, mis antakse ära kondensaatoris jahutusveele. Punkt E vastab kondensaadi regeneratiivse eelsoojenduse temperatuurile.

Rankine'i ringprotsessi kasutegur avaldub pindalade $ABCD$ ja $A'ABCD'$, suhtena:

$$\eta_t = \frac{\square ABCD}{\square A'BCD'} = 0,39.$$

Carnot' ringprotsessis avalduks kasulik töö pindalana $AA''CD$ ja lisatöö, võrreldes Rankine'i ringprotsessiga, kolmnurgana $AA''B$.

Küllastunud auru kasutamisel on Rankine'i ringprotsessi kasutegur lähedane Carnot' ringprotsessi kasutegurile:

$$\frac{\eta_t}{\eta_c} = \frac{0,39}{0,48} = 0,815,$$

sest soojuse juurdejuhtimine toimub osaliselt püsival temperatuuril.

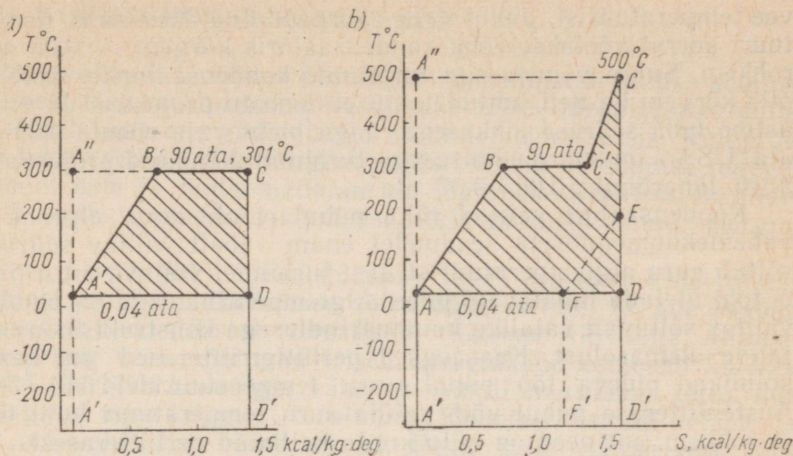
Carnot' ringprotsessi täiendav töö on ülekuumenenud auru kasutamisel kujutatud viirutamata pindalana $AA''CC'B$ ja Rankine'i ringprotsessi kasuteguri suhe Carnot' ringprotsessi kasutegurisse on sel juhul

$$\frac{\eta_t}{\eta_c} = \frac{0,42}{0,61} = 0,69.$$

Ülekuumendatud auru kasutamisel on püsival temperatuuril aurule juurdejuhtitud soojuse osa väiksem kui küllastunud auru puhul, mis põhjustab ka Rankine'i ringprotsessi kasuteguri suurema kõrvalekaldumise Carnot' ringprotsessi kasutegurist. Seejuures on aga ülekuumendatud auruga ringprotsessi kasutegur absoluutväärtuselt alati kõrgem kui samal rõhul küllastunud auruga töötava ringprotsessi kasutegur.

Olgu märgitud, et küllastunud auruga ringprotsess algrõhuga 90 ata ja lõpprõhuga 0,04 ata ei ole praktiliselt teostatav, sest auru niiskus oleks pärast paisumist turbiinis vähemalt 30—35%, vee piiskade kulutava toime tõttu on aga lubatav maksimaalne auru niiskus viimase astme labadel 13—14%. Et tagada seda tingimust, ei tohiks auru rõhk antud juhul pärast paisumist ületada 30—35 ata. Siis aga ei oleks ringprotsessi kasutegur üle 10%, samal ajal kui ülekuumendatud auru kasutamisel on ta 42%. Arusaadavalt on seega küllastunud auru kasutamine turbiinis ebatstarbekohane. Rankine'i ringprotsessi kasutegurit võib lähendada Carnot' ringprotsessi kasutegurile kahel viisil. Esimene moodus oleks kondensaadi regeneratiivne eelsoojendus (regeneratsioon — töötanud auru või gaasi soojuse tagasisuunamine ringprotsessi). Selleks juhitakse osa aurust mõnedest mitmeastmelise turbiini astmetest eelsoojenditesse, kus ta kondenseerub, soojendades ette turbiini kondensaatorist väljuvat kondensaati. Kaas-aegsetes turbiinides kasutatakse 6—8 kondensaadi regeneratiivse eelsoojenduse astet.

Joonisel 4 on joonega FE kujutatud tinglikult kondensaadi regeneratiivne eelsoojendus 28,6°C kuni 200°C. Soojuse regeneratsiooni tulemusel vähenevad soojuskadod kondensaatoris jahutusveele, sest kogu aur seal ei kondenseeru. Soojuskadude vähendamist kondensaatoris kujutab pindala $EFF'D'$. Ringprotsessi kasulik töö väheneb sel juhul pindala FFD võrra, sest kogu aur ei



Joon. 4. Auru ringprotsessid T - s -diagrammis: a — küllastunud auru ringprotsess; b — ülekuumendatud auru ringprotsess.

paisu rõhul 0,04 ata. Regeneratsiooni kasutamine annab soojuse kokkuhoidu 5—7%.

Teine moodus Rankine'i ringprotsessi kasuteguri tõstmiseks on auru vaheülekuumenduse kasutamine, mis lähendab soojuse juurdejuhtimise protsessid isotermilisele (püsival temperatuuril).

Praegusel ajal kasutatakse laialdaselt ühekordset auru vaheülekuumendust ja hakkab juurduma ka kahekordse vaheülekuumenduse kasutamine.

Kui aur temperatuuriga t_1 paisub turbiinis rõhult p_1 (entalpia i_1) rõhuni p_2' (entalpia i_2') ja seejärel suunatakse katlasse uuesti ülekuumendamiseks temperatuurini t' (entalpia i_1'), millele järgneb juba paisumine turbiinis lõpprõhuni p_2 (entalpia i_2), siis saadakse kasulikku tööd koguses $(i_1 - i_2') + (i_1' - i_2)$ kcal/kg. Üldine juurdejuhitud soojuse kogus ringprotsessis on $(i_1 - q_k) + (i_1' - i_2')$ ja ringprotsessi kasutegur avaldub järelikult valemiga

$$\eta_t = \frac{(i_2 - i_2') + (i_1' - i_2)}{(i_1 - q_k) + (i_1' - i_2')}$$

Vaheülekuumenduse kasutamine võimaldab vähendada soojuse erikulu 3—4% võrra. Teine vaheülekuumendus annab täiendavat soojuslikku ökonoomiat umbes 1,5%.

Seadmetes ilma vaheülekuumendusest on algrõhk, algtemperatuur ja auru lõpprõhk pärast turbiini omavahel sõltuvad. Rõhk turbiini järel (kondensaatoris) valitakse tehnilis-ökonomiliste arvutuste alusel ja kõigub tavaliselt piirides 0,03—0,04 ata, kui see on võimalik, lähtudes aasta keskmisest kondensaatori jahutus-

vee temperatuurist. Jahutusvee kõrgendatud keskmise temperatuuri korral võetakse rõhk kondensaatoris kõrgem — 0,05 ata ja rohkem. Suure võimsusega turbiinide kondensaatorites võib rõhk olla kõrgem ka neil juhtudel, kui ei õnnestu projekteerida viimase astme laba säärase pikkusega, nagu oleks vaja rõhule 0,03—0,04 ata. USA-s on suure võimsusega turbiinid mõnikord projekteeritud auru lõpprõhule 0,06—0,07 ata.

Kondensaatori valitud rõhu puhul ei ole auru algrõhk ilma vaheülekuumenduseeta seadmetes enam vabalt valitav suurus. Ta sõltub auru algtemperatuurist, sest turbiinist väljuva auru niiskus ei tohi ületada lubatavaid piire. Algtemperatuur aga on omakorda valitav sõltuvalt vajaliku kuumuskindlusega konstruktsioonimaterjalide olemasolust. Kaasaegsed perliitferriitterased on kasutuskõlblikud pideva töö puhul auru temperatuuridel 540—565 °C. Austeniitrase puhul võib valida auru temperatuuri kuni 650 °C ja rohkem, ent need on mitu korda kallimad perliitterasest.

Ühe- või kohekordse vaheülekuumendusega seadmetes ei piira auru algtemperatuur algrõhu väärtust, sest auru vaheülekuumendusega võib vältida auru lõppniiskuse suurenemist üle lubatavate piiride. Auru algrõhu valiku küsimus lahendatakse sel juhul tehnilis-ökonomiliste arvutuste alusel. Auru algrõhu tõstmine suurendab ringprotsessi kasutegurit, ent samaaegselt põhjustab ka seadmete kallinemist. Kui seadme arvutusliku kasutamisaaja vältel (100 000 tundi ehk 20—30 aastat) saavutatav kütuse kokkuhoid kompenseerib esialgsete kapitaalmahutuste suurenemise, siis valitakse võrreldud variantidest kõrgema rõhuga seade. Tavaliselt ei lähtuta säärares arvutustes mitte seadmete tõelisest eest, vaid normeeritud amortisatsiooniajast (8—10 aastat).

Auru temperatuuril 540—565 °C ja ühe- või kahekordsel vaheülekuumendusel sama temperatuurini kasvab ringprotsessi kasutegur märgatavalt algrõhu tõstmisel kuni 200—250 ata. Rõhu edasine tõstmine (kuni 400—600 ata) võib osutada majanduslikult kasulikuks auru temperatuuri tõstmisel 650—700 °C-ni, mis eeldab kalli austeniitrase kasutamist.

Praegusel ajal ehitatakse enamikus maades kõik suure võimsusega auruturbiinid (kuni 500—600 MW) auru algrõhule 165—170 ata. Säärares seadmete ringprotsessi kasutegur küünib kuni 54%. Auru rõhu tõstmine kuni 250 ata tõstab ringprotsessi kasutegurit 2,5—3% võrra.

Selline ringprotsessi kasuteguri kasv võib turbiini võimsusel 800—900 MW ja enam kompenseerida aurujõuseadme sisseseade kallinemise. Veel suurematel turbiini võimsustel (1000—1500 MW) ja kahekordse vaheülekuumenduse korral osutuvad rõhul 240—250 ata töötavate seadmete majanduslikud eelised võrreldes rõhule 165—170 ata ettenähtud seadmetega täiesti ilmseteks.

3. AURUTURBIINI KASUTEGUR

Ringprotsessi termiline kasutegur iseloomustab kütuse soojuse seda osa, mis muundatakse kasulikuks tööks ideaalses turbiinis, mis töötab ilma energiakadudeta muundamisprotsessis. Ringprotsessi kasutegur on seda kõrgem, mida kõrgem on soojuse regeneratsiooni aste ja mida madalam on lõpprõhk. Reaalses turbiinis esineb peale soojusekao kondensaatoris mitmeid muid energiakadusid.

Auru paisumisel turbiini düüsidel läheb osa auru kineetilisest energiast kaduma hõõrdumise tõttu düüsi seintel ja aur saabub töölabadele teoreetilisest võimalikust väiksema kiirusega. Analoo-gilised ning veel mõningad teised energiakaod esinevad ka töölabadel. Turbiini kasutegur väheneb samuti energiakao tõttu, mis on tingitud auru kiirusest turbiinist väljumisel, samuti ketaste ja auru omavahelisest hõõrdumisest. Peale selle voolab osa auru ilma kasulikku tööd tegemata ühest astmest teise läbi pilude diafragma ja võlli vahel ning turbiini kere ja töölabade vahel. Kõik nimetatud ja veel mõned teised energiakaod (näiteks auru niiskusega seotud kaod), mis tekivad turbiinis, kannavad sisemiste kadude nimetust ja nende suurust iseloomustab turbiini suhteline sisemine kasutegur η_s . Turbiinides esinevad ka mehaanilised kaod (energiakadu hõõrdumisele laagrites). Nende kadude suurust iseloomustab turbiini mehaaniline kasutegur η_m . Tegelikult turbiinis kasulikuks tööks muudetav soojuseosa on määratud efektiivse kasuteguriga

$$\eta_e = \eta_t \eta_s \eta_m.$$

Soojuse erikulu, s. t. soojuse hulk tunnis võimsuse 1 kW kohta avaldub turbiini efektiivse kasuteguri kaudu valemiga

$$q = \frac{860}{\eta_e} \text{ kcal/kWh.}$$

Turbiinil võimsusega 100 MW ja auru algparameetritega 29 ata, 400 °C on $q = 2736$ kcal/kWh; sama võimsusega turbiinil auru algparameetritega 90 ata, 500 °C on $q = 2357$ kcal/kWh.

Kõige täiuslikumatel suure võimsusega turboagregaatidel võib saavutada

$$\eta_e = 0,54 \cdot 0,86 \cdot 0,99 = 0,46.$$

Efektiivse kasuteguri edasine tõstmine on seotud ringprotsessi termilise kasuteguri ja turbiini suhtelise sisemise kasuteguri tõstmisega.

Energiakaod esinevad ka elektrigeneraatorites. Võimsus elektrigeneraatori klemmidel (elektriline võimsus) on väiksem võimsusest turbiini võllil (efektiivsest võimsusest) energiakadude võrra

generaatoris. Need kaod määravad generaatori kasuteguri η_3 väärtuse.

Elektrigeneraatori elektriline kasutegur

$$\eta_{el} = \eta_t \eta_s \eta_m \eta_g = \eta_e \eta_g.$$

Elektrilise kasuteguri suurus iseloomustab elektrienergiaks muundatud osa auruga turbiini toodud üldisest soojusest.

4. KODUMAISE AURUTURBIINIEHITUSE ARENGU MÕNINGAD ETAPID

Esimese maailmasõja alguses ületas auruturbiinide maksimaalne võimsus 10 000 kW. Venemaal algas statsionaarsete auruturbiinide tootmine Metallitehases 1907. aastal, mil hakati tootma 200-kW võimsusega turbiine. Aastal 1916 ehitati juba turbiin võimsusega 1250 kW. Veelgi võimsamaid turbiine ehitati laevadele.

Revolutsioonieelsel perioodil toodetud statsionaarsete turbiinide üldine võimsus oli 8967 kW, samal ajal, kui laevaturbiinide koguvõimsus oli 1,4 milj. hj.

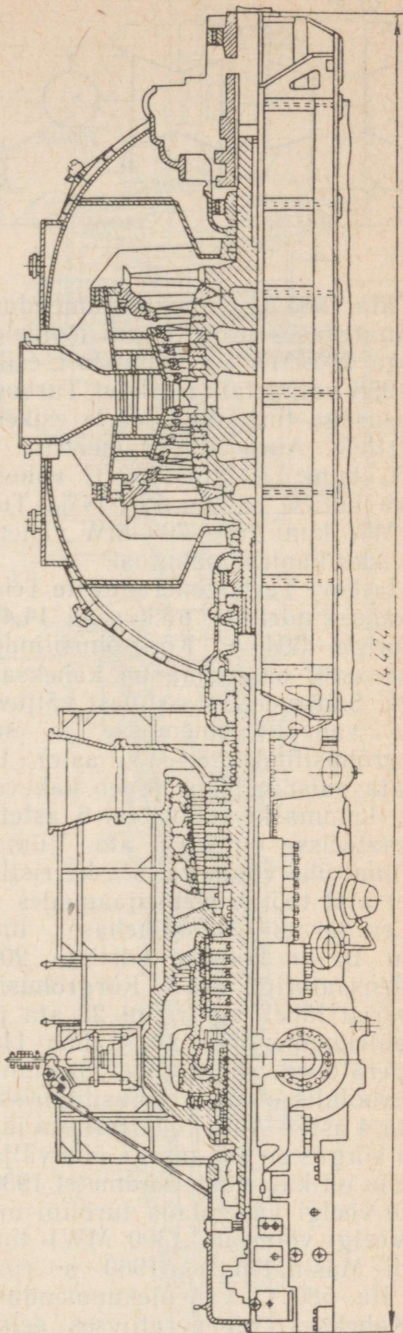
Kuni 1914. a. projekteeriti auruturbiine auru algparameetritele 12—16 ata, 300 °C. Aastateks 1925—1930 auru algparameetrid tõusid kuni 25—30 ata, 350—425 °C, seejärel aga kuni 90—100 ata, 450—500 °C. Teise maailmasõja järel algas veelgi kõrgemate parameetrite, 140—250 ata, 550—600 °C, juurutamine. Turboagregaatide võimsus kasvas kuni 200—300 MW ja üle selle.

Aastal 1931 käiku lastud Leningradi Masinatehase 50-MW turbiin auru parameetritega 29 ata, 400 °C oli kahesilindriline agregaat pöörlemiskiirusega 1500 p/min. 1938. a. valmistas tehas ühekorpuselise 50-MW turbiini pöörlemiskiirusega 3000 p/min, millega õnnestus agregaadid kaalu vähendada 240-lt tonnilt 161 tonnini.

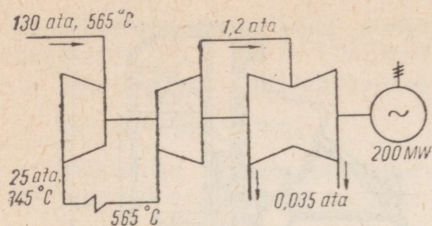
Veel enne Teist maailmasõda alustati Nõukogude Liidus töid auruturbiiniseadmete ehitamiseks auru algparameetritele 100—120 ata, 500 °C. Sõda katkestas need tööd ja alles sõja lõpuks lõpetati Leningradi Masinatehases turbiinide seeria väljatöötamist võimsustega 25, 50 ja 100 MW, auru parameetritele 90 ata ja 500 °C. Selle seeria turbiin, võimsusega 100 MW, valmis 1946. a. See oli kahesilindriline kondensatsiooniturbiin kahevoollise madalrõhusilindriga (auru kahe väljalasuga kondensaatorisse).

1953. aastal valmistati samas tehases esimene turbiin võimsusega 150 MW auru algparameetritele 170 ata, 550 °C ja auru vaheülekuumendusega kuni 520 °C. Sel ajal oli see Euroopa kõige võimsamaks ühevõlliliseks turboagregaadiks.

Järgnevalt võeti NSV Liidus kasutusele auru algparameetrid



Joon. 5. Auruturbiin K-150-130 võimsusega 150 MW.



Joon. 6. 200-MW auruturbiini K-200-130 skeem.

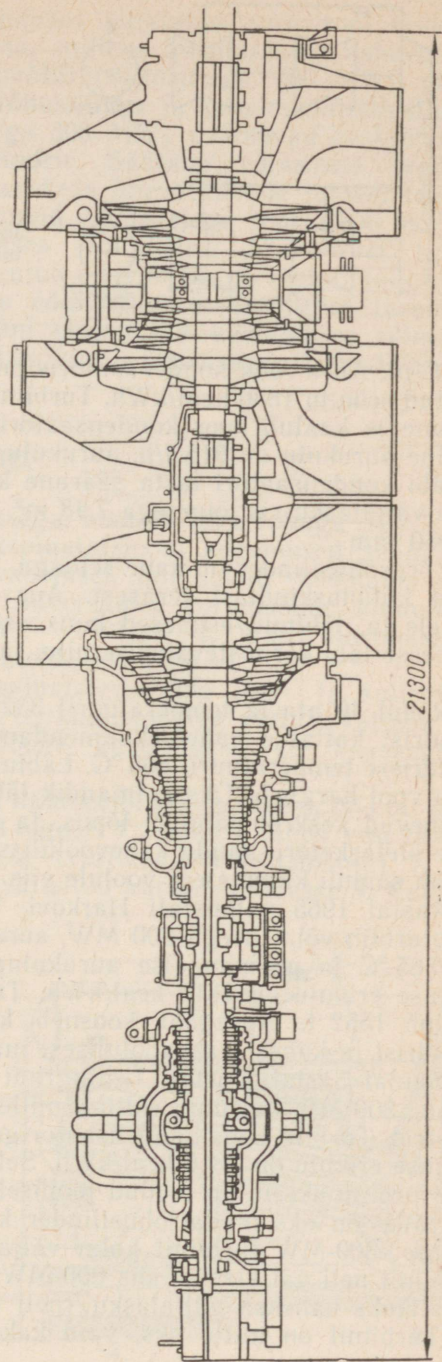
130 ata, 565 °C vaheülekuumendusega kuni 565 °C. Leningradi Masinatehases projekteeriti nendele parameetritele turbiin võimsusega 200 MW ja valmistati esikeksemplar aastal 1957. Aastal 1958 valmistati Harkovi Turbogeneraatorite Tehases 150-MW võimsusega turbiinide seeria esikeksemplar samadele auru parameetritele. Auru algparameetrite tõstmine väärtustelt 90 ata, 500 °C kuni 130 ata, 565 °C vaheülekuumendusega kuni 565 °C annab kütuse säästu 12—14%. Turbiini võimsuse suurendamine 100 MW kuni 150—200 MW vähendas elektriijaama ehitamiseks vajalikke kapitalimahutusi.

Harkovi Turbogeneraatorite Tehase turbiin K-150-130 (joon. 5) on kaheasilindiline, pikkusega 14,474 m ja kaalub koos kondensaatoriga 594 t. Kõrgrõhusilindris on 15 astet. Esimesed seitse astet on ülejäänud kaheksast astmest eraldatud diafragmaga. Seitsmendast astmest väljuv aur, rõhul 32 ata, suunatakse katla vaheülekuumendisse ja saabub tagasi keskrõhuosasse (kõrgrõhusilindri 8.—15. aste) temperatuuril 565 °C. Rõhuni 4,6 ata paisunud aur läheb kahevoolulisse madalrõhusilindrisse, mille kummaski voolus on 6 astet. Auru rõhk sisenemisel kondensaatorisse on 0,035 ata. Viimase astme labade pikkus on 780 mm, ühe voolu väljalaske ristlõike pindala on 5,21 m². Praegusel ajal töötab elektriijaamades umbes 50 säärast turbiini.

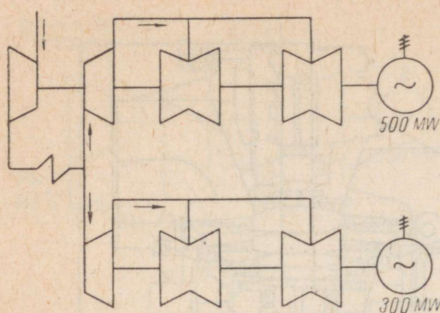
Leningradi Masinatehase turbiin võimsusega 200 MW (joon. 6) on kolmesilindiline, 20,6 m pikkune ja kaalub koos kondensaatoriga 776 t. Kõrgrõhusilindris on 11 astet. Kõrgrõhusilindrist läheb aur rõhul 25 ata ja temperatuuriga 345 °C katla vaheülekuumendisse ja saabub 11-astmelisse keskrõhusilindrisse temperatuuril 565 °C. Seal paisunud aur juhatakse rõhul 1,2 ata kahevoolulisse madalrõhusilindrisse, millel on kummagi voolu kohta 4 astet. Auru rõhk turbiini järel on 0,035 ata. Viimase astme laba kõrgus on 765 mm ja ühe väljalasasu ristlõige 5,04 m². Soojuse erikulu on katsetuste andmetel 1930 kcal/kWh, mida aga kavatsatakse veelgi vähendada turbiini moderniseerimisel.

Veelgi võimsam (300 MW) turbiin K-300-240 ehitati Leningradi Masinatehases 1960. a. (joon. 7). Auru algparameetrid 240 ata, 580 °C, vaheülekuumenduse temperatuur 565 °C.

Kaheksas regeneratiivses eelsoojendis soojeneb kondensaat



Joop. 7. Auruturbiin K-300-240 võimsusega 300 MW.



Joon. 8. Kahevõllilise 800-MW auru-
turbiini skeem.

265 °C-ni. Auru rõhk kondensaatoris on 0,035 ata, soojuse projektteeritud erikulu 1830 kcal/kWh. Turbiin on kolmesilindriline, 21,3 m pikkune ja kaalub koos kondensaatoriga 1025 t. Turbiini maksimaalne aurukulu on 915 t/h, aurukulu läbi kondensaatori 570 t/h. Et läbi kondensaatori lasta säärane kogus auru, on ette nähtud kolm väljalasku ristlõigetega 7,48 m². Viimase astme laba pikkus on 960 mm.

Kõrgrõhusilinder on kahe seinaga. Sisemine korpus on valmistatud kuumuskindlast terasest. Aur juhitakse kõrgrõhusilindri keskele ja, läbinud esimesed kuus astet, läheb ülejäänud kuude astmesse läbi korpustevahelise pilu, jahutades seega sisemist korpust.

Rõhul 40 ata ja temperatuuril 332 °C juhitakse aur kõrgrõhusilindrist katlasse vaheülekuumendamiseks ja saabub keskrõhusilindrisse temperatuuril 565 °C. Läbinud keskrõhusilindri 12 astet, auru vool hargneb. Üks kolmandik läbib viis madalrõhuastet, mis paiknevad keskrõhusilindri lõpus, ja kaks kolmandikku juhitakse kahe ülelasketoru kaudu kahevoolulisse madalrõhusilindrisse, milles on samuti kummalegi voolule viis astet.

Aastal 1965 valmistati Harkovi Turbogeneraatorite Tehases auruturbiin võimsusega 500 MW, auru algparameetritega 240 ata, 580/565 °C ja maksimaalse aurukuluga 1540 t/h. Projekteeritud soojuse erikulu on 1815 kcal/kWh. Turbiin koos kondensaatoriga kaalub 1552 t. Agregaat koosneb kõrgrõhusilindrist, keskrõhusilindrist ja kahest kahevoolulisest madalrõhusilindrist.

Samal aastal lõpetati Leningradi Masinatehases veel võimsama, 800-MW turbiini ehitus, millel on samad auru algparameetrid. Turbiin koos kondensaatoriga kaalub 2550 t. Projektiline soojuse erikulu on 1810 kcal/kWh. Selle, NSVL esimese kahevõllilise turbiini skeem on toodud joonisel 8. Kui turbiinil võimsusega 200 MW on üks madalrõhusilinder kahe väljalasuga kondensaatorisse, 300-MW turbiinil kolm väljalasku, 500-MW võimsusega turbiinil neli väljalasku, siis 800-MW võimsusega turbiinil osutus vajalikuks kaheksa väljalasku (neli madalrõhusilindrit).

Turbiinil on mitte üks, vaid kaks keskrõhusilindrit. 800-MW

turbiini ühevõllilises kujunduses jagatakse auru vool keskrõhusilindris samuti kahte ossa, milleks kasutatakse kahevoolulist keskrõhusilindrit. Kõrgrõhuvõllil (võimsusega 500 MW), paiknevad kõrgrõhusilinder, keskrõhusilinder ja kaks madalrõhusilindrit. Madalrõhuvõllil (võimsusega 300 MW) paiknevad keskrõhusilinder ja kaks madalrõhusilindrit. Säärane võimsuste jagamine kahele võllile võimaldab kasutada ühevõllilistele turbiinidele olemasolevaid elektrigeneraatoreid võimsustega 300 ja 500 MW.

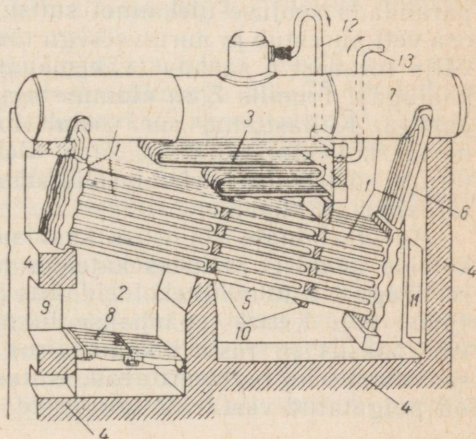
Leningradi Masinatehases ehitatakse ühevõllilist turbiini võimsusele 800 MW, mis osutub odavamaks ja metallikulu suhtes kergemaks, võrreldes sama võimsusega kahevõllilise turbiiniga. Ühevõllilise 800-MW turbiini elementide kasutamine võimaldab tulevikus luua kahevõllilist turbiini võimsusega 1500—1600 MW.

5. KATELAGREGAADID

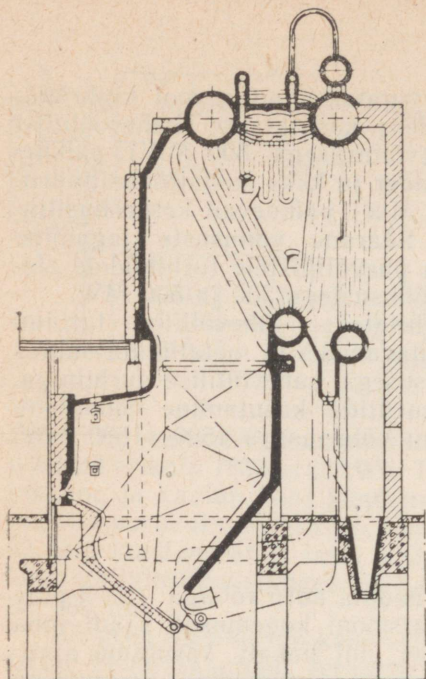
Lihtsate, väikese võimsusega, madala auru rõhuga (2—3 ata) aurukatelde tootmise ja eksploatatsiooni kogemused saadi juba XVII ja XVIII sajandite vahetusel, mil hakati kasutama aurukäitusega vee pumpamist. Universaalse aurumasina ilmumisega (I. I. Polzunovi aurumasin — 1765. a., J. Watti aurumasin — 1784. a.) laienes sääraste katelde tootmine.

XIX sajandi lõpuks eksplateeriti juba leek- ja suitsutorukatelde kõrval ka loomuliku tsirkulatsiooniga vesitorukatlaid, millede täiustatud konstruktsioone kasutatakse ka kaasaegsetes elektrijaamades.

Joonisel 9 on toodud ühe kaldveetorukatla skeem, mis oli laialt kasutusel veel 30—40 aastat tagasi. Trumlist 7 läheb vesi laskutorude 6 kaudu kollektoritesse (vertikaalsed sektsioonid) 1, millest jaguneb kollektoritesse valtsitud aurustorusse 5. Koldes 2



Joon. 9. Kaldvesitoru-aurukatel.



Joon. 10. Nelja trumliga aurukatel, 30/40 t/h, 32 ata.

ja restil 8 toimub luugi 9 kaudu sisseantava kütuse põletamine. Kütuse põlemissaadused (suitsugaasid) tõusevad üles ja uhuvad aurustorusid ning seejärel ülekuumendi torusid 3. Edasi laskuvad gaasid vaheseinte 10 vahel alla torukimpu, pööravad siis uuesti üles ja müürituses 4 oleva ava 11 kaudu väljuvad korstnasse. Katla ja suitsuimeja (ventilaatori) vahel võib paikneda veel ökonomaiser, milles katla toitevesi kuumeneb enne trumlisse saabumist.

Katla torudesüsteem varustatakse vaheseintega selleks, et parandada soojuse ülekannet suitsugaasidelt torudele. Torudes 5 osa vett aurustub ja auru-veesegu tõuseb trumlisse, sest teda surub välja torudest 6 saabuv vähemkuumutatud vesi (suurema erikaaluga). Trumli 7 on alumine osa täidetud veega, ülemine aga auruga. Küllastunud aur voolab torude 12 kaudu auru ülekuumendi kollektorisse 3 ja saab ülekuumenduse selle küttepinnal torude süsteemis. Ülekuumendatud aur suunatakse turbiini aurutorustiku 13 kaudu.

Auruturbiinide võimsuse kasv nõudis ka suure tootlikkusega katelde loomist. Sellistes kateldes hakati kasutama koldeid kettrestidega või tolmküttekoldeid, kus põletatakse tolmustatud kütust (joon. 10). Kettrest pannakse liikuma elektrimootoriga. Kütusekihi paksus ja resti liikumiskiirus on kütuse parema põlemise saavutamiseks reguleeritavad. Kütus saabub restile punkrist, mis on paigutatud vastavale kõrgusele.

Vesi paremast ülemisest trumlist laskub torukimbu kaudu alumisse trumliisse. See kimp on vaheseinaga varjatud kuumade gaaside eest, millega on välditud vee keemahakkamine. Alumisest trumlist tõuseb aurustuv segu suitsugaasidega kuumutatava kimbu kaudu vasakusse ülemisse trumliisse. Ülemised trumlid on omavahel ühendatud horisontaalsete ülelasketorudega. Parema ülemise trumli peal asetsevast aurutoomist läheb aur edasi auruülekuumendisse, mis on moodustatud vertikaalsetest torudest.

Torukimp, mis ühendab parempoolset ülemist ja alumist trumlit, töötab ökonomaiserina. Kolde seinad on kaetud vertikaalsetest torudest moodustatud paneelidega, kus samuti toimub aurustumine. Need nn. ekraanid kaitsevad kolde seinu (tulekindlast tellisest müüritust) gaaside kõrge temperatuuri eest, mis on vajalik kivisöetolmu stabiilseks põlemiseks.

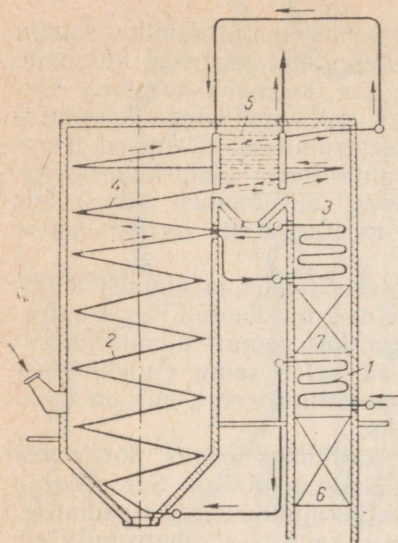
Katla trummel on tema kõige kallimaks osaks, kusjuures trumli maksumus kasvab koos rõhu suurenemisega. See asjaolu tingis ülemineku neljatrumliliselt katlakujunduselt lihtsamatele, esmalt kolmetrumlilisele ja seejärel kahe- ja ühetrumlilisele kujundusele.

Revolutsioonieelsel Venemaal toodeti vähesel hulgal auru- katlaid tootlikkusega mitte üle 8—12 t/h ja auru parameetritega mitte üle 15—17 ata, 300—350 °C. 1913. aastal toodeti aurukatlaid summaarse küttepinnaga 30 tuh. m², millele vastab aurutootlikkus 600 t/h.

GOELRO plaani täitmine nõudis kodumaise katlaehitustööstuse loomist kaasaegsel tehnilisel tasemel. Osutus vajalikuks luua spetsialiseeritud tehased vajaliku tehnoloogilise sisseseadega, ette valmistada konstruktorite ja tehnoloogide kaadrid, välja töötada teaduslikult põhjendatud meetodid aurukatelde arvutamiseks. Varem katlaid tootnud väikesed tehased ühendati masinaehitustrustideks, tehased spetsialiseeriti kindlatele katlatüüpidele ja varustati vajaliku tehnoloogilise sisseseadega (trumlite keevitus, torude painutus, stantsimine, valu).

Aastatest 1927—1928 algas tolle aja kohta suurte katelagregaatide tootmine. Katelagregaatide tootlikkusega 50—75 t/h valmistati V. I. Lenini nim. Nevski tehases, katelagregaatide 150—200 t/h — Leningradi Metallitehases ja Taganrogi tehases «Krasnõi kotelštšik». Aastaks 1940 läksid tehased üle nelja-, kolme- ja kahe- trumlilistelt katelagregaatide konstruktsioonidelt ühetrumlilistele, edestades välismaiseid firmasid.

Aastal 1933 valmistati esimene, professor L. K. Ramzini originaalse konstruktsiooniga otsevolukatel tootlikkusega 200 t/h auru rõhule 100 ata (joon. 11). Otsevolukatel on ilma trumlita, tema küttepinnad koosnevad paralleelselt lülitatud torudest, kuhu vesi antakse pumba jõul. Nendes torudes toimub vee eelsoojendus, tema aurustamine ja auru ülekuumendus. Vesi saabub pumbast



Joon. 11. Otsevolukatla skeem, 200 t/h, 100 ata, 495 °C.

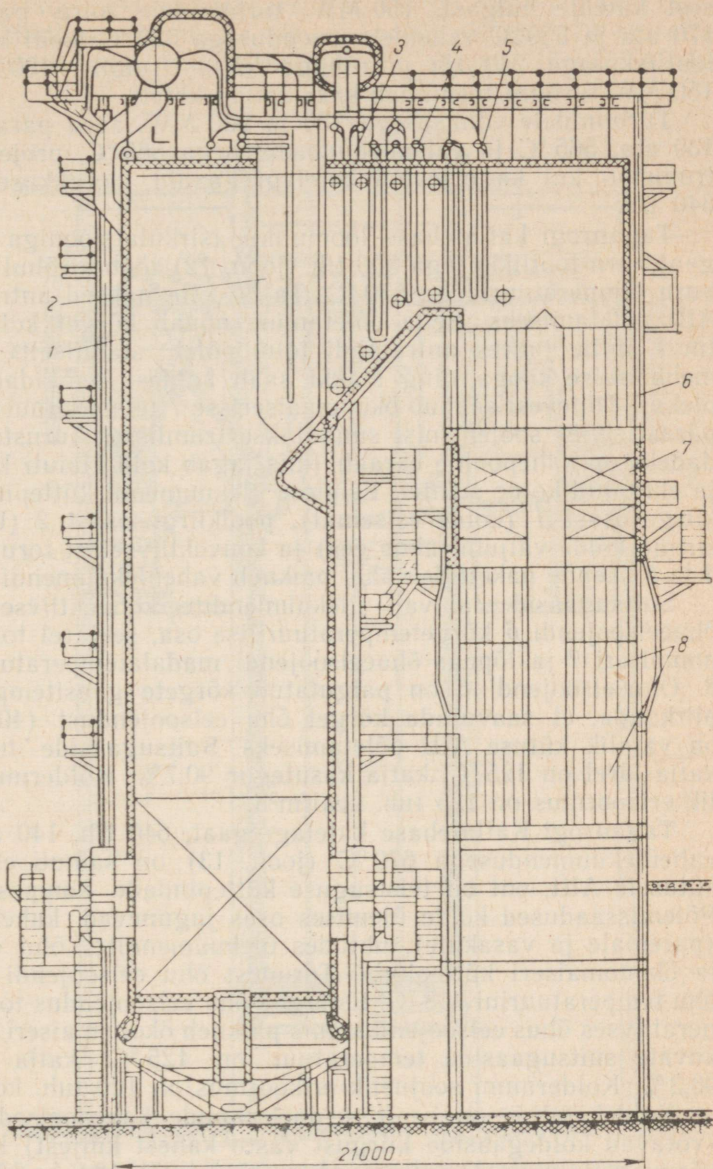
ökonomaiseri torupaketti 1 ja voolab seejärel läbi kolde alumises osas paiknevate torude. See küttepind võtab soojust vastu leegi kiirguse arvel ja teda nimetatakse vastavalt kiirgusküttepinnaks. Küttepinnad, kus soojuste vastuvõtt toimub gaasidega vahetu kokkupuute tulemusel, on nn. konvektiivsed küttepinnad.

Torudes 2 lõpeb vee ettesoojendus kuni keemistemperatuurini ja algab aurustamine. Vee aurustamine lõpeb üleminekutsoonis 3, mis on paigutatud gaaside möödukate temperatuuride piirkonda, sest aurustumisprotsessi lõpus sadestub toru seintele katlakivi. Kui katlakivi sadenemine toimuks kiirgusküttepinnas (koldes), siis see võiks põhjustada torude ülekuumenemist. Üleminekutsoonis algab auru ülekuumendus, mis jätkub kiirgusküttepinnas 4 ja lõpeb konvektiivses kimbus 5. Õhu eelsoojendus toimub õhuelsoojendites 6 ja 7.

Otsevolukatel on sama tootlikkusega trummelkatlaga võrreldes kergem. Energiakulu toitepumba käitamiseks on aga otsevolukatal suurem. Otsevolukatel on ka nõudlikum toitevee puhastuse suhtes sooladest ja mitmesugustest lisanditest.

Sõjajärgsetel aastatel organiseeriti suurte katlagregaatide tootmist Podolski ja Barnauli katlatehastes ja reorganiseeriti Taganrogi tehases.

Kodumaise katlaehituse sõjajärgse perioodi iseärasuseks on üleminek kõrgete auruparameetritega võimsate katlagregaatide tootmisele. Loodi seeria katlaid auru rõhule 100 ata ja temperatuurile 560 °C tootlikkuse juures 120, 170 ja 230 t/h. Katel tootlikkusega 230 t/h tagab auru andmise 50-MW kondensatsiooniturbiinile. Aastaks 1955 toodeti kõrgrõhukatlaid 75% üldi-



Joon. 12. Katelagregaat TII-90 tootlikkusega 500 t/h blokile 150-MW turbiiniga.

sest katelde hulgast. 150-MW turbiinidele auru parameetritel 170 ata ja 550 °C vaheülekuumendusega 520 °C loodi katlad auru tootlikkusega 240 t/h ja rõhuga katla trumlis 180 ata. Igat 150-MW turbiini teenindab kaks sellist katelt.

Turbiinidele võimsusega 150 ja 200 MW, auru parameetritega 130 ata, 565 °C ja vaheülekuumendusega 565 °C, projekteeriti nii trummel- kui ka otsevoolukatelagregaadid tootlikkusega 500 ja 640 t/h.

Taganrogi katlatehase loomuliku tsirkulatsiooniga katelagregaat auru tootlikkusega 500 t/h (joon. 12) töötab rõhul 140 ata ja auru temperatuuridega 570 °C. Ta on ette nähtud antratsiidipuru AIII põletamiseks. Selle põletamine nõuab kõrget koldetemperatuuri, mille juures antratsiidi tolmu põleb stabiilselt ja väikese mehaanilise kaoga ning šlakki saab koldest eemaldada vedelas olekus. Toitevesi saabub ökonomaiserisse 7 temperatuuril 230 °C ja pärast selles soojenemist suunatakse trumlisse. Aurustusküttepindadeks on kahepoolne ekraan (mis jagab kolde laiuti kahte ossa) ja ekraanid kolde seintel. Esimese ülekuumendi küttepind koosneb kiirgusosast 1 (kolde esiseinal), poolkiirgusosast 2 (U-kujulised sirmid kolde väljumisakna ees) ja konvektiivsetest torupakettidest 3 ja 5. Nende pakettide vahel paikneb vaheülekuumendi 4.

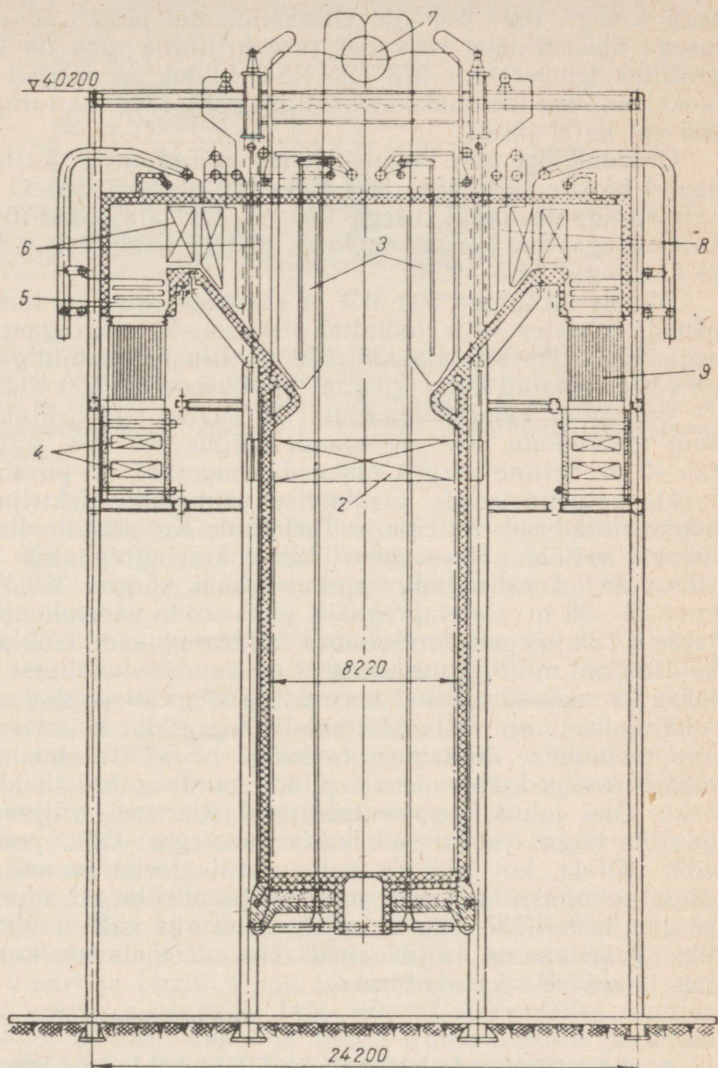
Suitsugaasid läbivad ülekuumendite konvektiivsed paketid, õhuelsoojendi 6 kõrgetemperatuurilise osa, seejärel toitevee ökonomaiseris 7 ja lõpuks õhuelsoojendi madalatemperatuurilise osa 8. Õhuelsoojendi 6 on paigutatud kõrgete gaasitemperatuuride piirkonda, et saavutada kõrget õhu eelsoojendust (405 °C), mis on vajalik kütuse AIII põletamiseks. Suitsugaaside temperatuur katla järel on 125 °C, katla kasutegur 90,7%. Kolderuumi soojuslik erikoormus on 125 tuh. kcal/m³h.

Taganrogi Katlatehase katelagregaat, 640 t/h, 140 ata, 570 °C vaheülekuumendusega 670 °C (joon. 13) on samuti ette nähtud kütusele AIII, ent on teistsuguse küttepindade kompositsiooniga. Põlemissaadused kolde ülemises osas jagunevad kaheks vooluks (paremale ja vasakule), uhtudes ülekuumendite, õhu eelsoojendi ja ökonomaiseris küttepindu. Torudest õhu eelsoojendi kuumutab õhu temperatuurini 398 °C. Esialgne õhu eelsoojendus toimub regeneratiivses õhus eelsoojendis, mis paikneb ökonomaiseris järel. Lahkuvate suitsugaaside temperatuur on 125 °C, katla kasutegur 90,3%. Kolderuumi soojuslik erikoormus on 120 tuh. kcal/m³h.

Koldekambris on peale seinaekraanide kahepoolsed ekraanid (võtavad koldegaaside kiirgust vastu kahest küljest) kogu kolde kõrguse ulatuses. Metallis mass on 2719 t ehk 13,6 kg/kW, mis on 5,1 kg/kW väiksem, võrreldes katlaga 420 t/h blokile turbiiniga 100 MW.

Loomuliku tsirkulatsiooniga katlad võivad töötada aururõhkude juures trumlis kuni 185–190 ata, sest edasisel rõhu tõstmisel muutuks tsirkulatsioon ebapüsivaks. Sellise rõhu puhul

trumlis saadakse ülekuumendi järel aur rõhuga 165—170 ata. Tsiirkulatsioonikindluse tõstmiseks võivad katlad rõhuga 170 ata olla ehitatud mitmekordse sundtsirkulatsiooni skeemi järgi. Selleks



Joon. 13. Katelagregaat TII-100 tootlikkusega 640 t/h blokile 200-MW turbiiniga: 1 — koldekamber; 2 — kiirgus-ülekuumendi; 3 — esimese ülekuumendi sirmid; 4 — toitevee ökonomaizer; 5 — vaheülekuumendi reguleerimiskimp; 6 — esimese ülekuumendi konvektiivne osa; 7 — katla trummel; 8 — vaheülekuumendi; 9 — õhuelsoojendi.

kasutatakse tsirkulatsioonipumpasid, mis annavad veele ja veeaurusegule vajaliku rõhu ja kiiruse olenevalt katla koormusest.

Auru rõhkudel katlast väljumisel üle 180 ata saab kasutada ainult otsevoolukatlaid. Saksa FV-s on laialt kasutusel katlad auru rõhuga 180—200 ata. Otsevoolukatel töötab suurema kindlusega ülekritilistel rõhkudel (vee kriitiline rõhk on 225 ata ja kriitiline temperatuur 373 °C). NSV Liidus on valitud võimsates blokkides auru töö rõhuks ülekritiline rõhk (240 ata turbiini juures, 265 ata katla järel).

Ordžonikidze nim. Podolski tehas ja Taganrogi Katlatehas toodavad blokile turbiiniga 300 MW, 240 ata, 580/565 °C otsevoolukatlagregaate tootlikkusega 950 t/h, 250 ata, 585/570 °C. Nende katlagregaatide kõrgus on 42 m, metalli kaal 13,3 — 11,4 kg/kW ja kasutegur 92,5—92%.

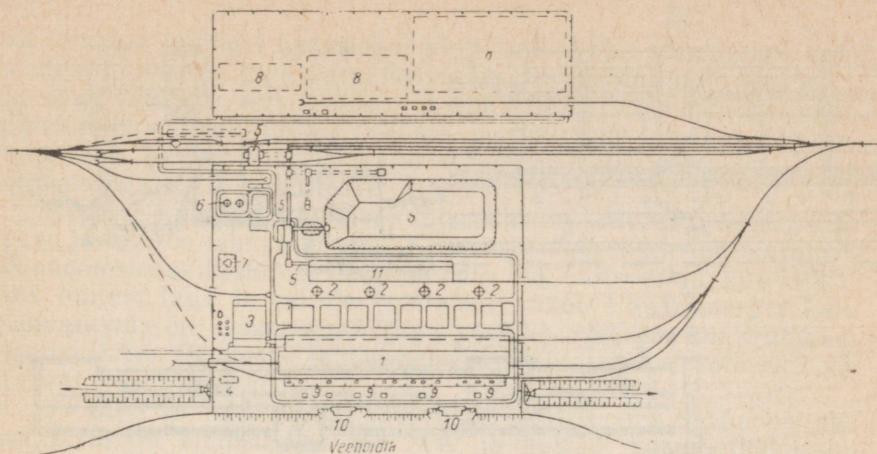
Blokile turbiiniga 500 MW ja samadele auru parameetritele on nendes tehastes välja töötatud otsevoolu-katlagregaat tootlikkusega 1600 t/h, 255 ata, 585/570 °C. Blokile turbiiniga 800 MW on välja töötatud katlagregaat tootlikkusega 2500 t/h.

Võimsatel katlagregaatidel on suured gabariitmõõtmed ja suur metallikulu. Katlagregaadi kõrgus 300 MW turbiinile ületab 40 m. Selline kõrgus raskendab montaaži ja piirab monteeritavate betoondetailide kasutamise võimalust elektriijaama peahoone ehitamisel. Katelde ja Turbiinide Keskinstituudis (ЦКТИ) tehakse eeltöid väikesegabariidiliste katlagregaatide loomiseks. Ülesanne on vähendada katlagregaadi kõrgus 300-MW blokile kuni 25—26 m. Katlagregaadi gabariitide vähendamiseks töötatakse välja kõrgelt forsseeritud koldeseadmeid: tsüklon-, pööriskolded jne., mille soojuskoormus on suurem tavalisest. Forsseeritakse ka soojusülekanne konvektiivsetes küttepindades.

Tavaliselt on töötavate katlagregaatide kolletes hõrendus, mis tekitatakse suitsuventilaatoriga. Seetõttu imetakse katla müürituses ja kattes olevate pilude kaudu gaasikäikudesse välisõhku. Öhu juurdeimemise tulemusel suureneb väljuvate suitsugaaside kogus ja väheneb katla kasutegur. Öhu juurdeimemist võib vältida, kui loobuda suitsuventilaatorist ja anda õhk koldesse puhumisventilaatori poolt tekitatud rõhu all, mis oleks veidi kõrgem atmosfäärirõhust. Selleks peab aga katla müüritus olema tihe. Tulevikus on väljavaateid rõhu all töötavate katlagregaatide laialdaseks kasutamiseks.

6. KONDENSATSIOONELEKTRIIJAAMA SEADMESTIK

Kondensatsioonielektriijaamad toodavad ainult elektrienergiat. Elektriijaama turbiinis töötanud aur kondenseerub kondensaatoris, andes oma soojuse jahutusveele. Selliseid turbiine nimetatakse kondensatsiooniturbiinideks.



Joon. 14. 2400-MW kondensatsioonelektrijaama põhiplaanis skeem: 1 — peahoone; 2 — korstnad; 3 — abihoone; 4 — veemahutid; 5 — kütuse etteanne ja ladu; 6 — masuudi- ja õliladud; 7 — atsetüleeni-hapnikuseade; 8 — 110-, 220- ja 500-kV jaotusseadmed; 9 — trafod; 10 — tehnilise veevarustuse pumbajaam; 11 — tolmuvalik.

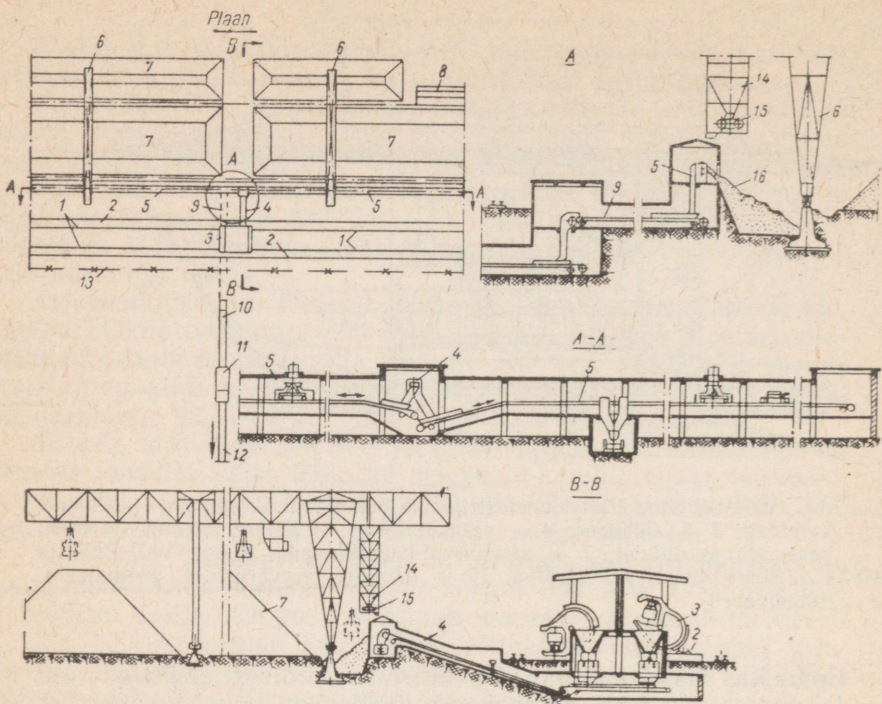
Enamikus maades annavad põhilise osa üldisest elektrienergia toodangust (kuni 80% ja rohkem) kondensatsioonelektrijaamad. Neid ehitatakse tänapäeval võimsusega kuni 2–3 milj. kW turboagregaatide võimsuse juures 300–500 MW.

Kaasaegne võimas kondensatsioonelektrijaam kujutab endast kombinaati, mis koosneb reast tsehhidest. Katla-, turbiini- ja elektritsehh paiknevad peahoones (joon. 14). Kütus (kivisüsi, masuut) saabub raudteega. Katlamaja lähedal asub kivisöeladu. Kivisöetolm antakse katelde põletitesse. Katelde sissekütamiseks kasutatakse masuuti. Jahutusvesi suunatakse veehoidlast turbiinide kondensaatoritesse tsirkulatsioonipumpade abil.

Abihoones paiknevad vee-ettevalmistusseadmed, remonditsehh ja teised abiteenistused.

Kütusetsehh tagab kütuse ettevalmistuse ja etteandmise kateldesse ja omab ühtlasi kütuse reservlaod juhaks, kui katkeb kütuse juurdevedu. Olenevalt põletatava kütuse liigist, tema elektrijaama suunamise viisist ja territooriumi planeeringust on kütuse-transportitsehhil vastav sisseseade: laia- või kitsarööpmelise raudtee koosseis, köisteed, lint-, kopp- ja teised transportöörid ja muud seadmed. Selle sisseseade abil toimub kütuse laadimine reserv- ja tarbeladudes, tema etteandmine ladudest katlamajja (või tsentraalsesse tolmutehasesse) ja tavaline kütuse etteandmine saabuvatest vagunitest katlamajja.

Joonisel 15 on toodud üks kivisöeküttega suure võimsusega elektrijaama kütuse etteande variantidest. Kivisüsi saabub jaama



Joon. 15. Elektri jaama kütuse etteande skeem; 1, 2 — raudteed; 3 — vagunikalluti; 4 — konveier kivisöe andmiseks lattu; 5 — reserveeritavad konveierid kivisöe suunamiseks lattu ja laost tagasi; 6 — laadimissildkraanad; 7 — kivisöe staapelid; 8 — estakaad vigastatud vagunite tühjendamiseks; 9 — konveier kivisöe laost väljaviimiseks; 10 — konveierid kivisöe andmiseks laost ja vagunikallutist; 11 — peenestusseade; 12 — konveierid kivisöe andmiseks katlamajja; 13 — piire; 14 — laadimis-sildkraana punker; 15 — söötja; 16 — lattu antava kütuse tranšee.

vagunites, mis tühjendatakse punkritesse vagunikallutite abil. Vastuvõtupunkritest antakse kivisüsi vastavate söötjate abil konveierile, mis viib ta sildlaaduri juurde. Greiferkraanaga sildlaadur paigutab kivisöe staapelitesse või lintransporditööriale teisaldamiseks purustusseadmesse, kust ta toimetatakse edasi transportööri katlamajja.

Väga suure võimsusega elektri jaamades kasutatakse sildlaaduri asemel odavamaid ja suurema tootlikkusega seadmeid — ratasskreepereid ja buldoosereid.

Kütuse (kivisüsi, põlevkivi) tolmu kujul põletamise korral on elektri jaamas kütuse ettevalmistamise osakond sisseseadega kütuse peenestamiseks ja peenjahvatuseks. Joonisel 16 on näidatud üks seadmetest kivisöe jahvatamiseks trummel-kuulveskis. Peenestatud kivisüsi saabub punkrist pöörlevasse trumliisse, mis

on täidetud malmist kuulidega. Ventilaatori abil suunatakse kivi-
söetolmu ja õhu segu separaatorisse, milles eraldub jämedam tolm,
ja edasi tsükloni, kus eraldub vajaliku jahvatuspeensuslega tolm.
Jäme tolm suundub tagasi veskisse, peenike tolm läheb aga tolm-
punkrisse. Sellest punkrist antakse ta spetsiaalse söötja abil koos
õhuvooluga katla põletitesse.

Aeglase käiguga trummel-kuulveskid on kasutusel antratsiidi-
puru ja kivisöe jahvatamiseks. Kivisöe jahvatamiseks on seejuures
ökonomsemad keskmise käiguga rull- ehk valtsveskid, kus jahva-
tus toimub laua ja rullide (valtside) vahel. Elektrienergia kulu
jahvatuseks on keskmise käiguga veskites väiksem kui trummel-
kuulveskites. Pruunsöe jahvatamiseks kasutatakse vasarveskit või
jahvatusventilaatorit.

Joonisel 16 on näidatud kaasaegse elektrijaama peahoone, kus
on turbiinid võimsusega 200 MW ja katlad aurutootlikkusega
640 t/h (blokid katel-turbiin). Masinasaali on paigutatud turbiinid
kondensaatoritega, toitepumbad, toitevee regeneratiivsed eelsoo-
jendid ja turbiinide abiseadmed.

Paremal masinasaalist paikneb galerii, kuhu on paigutatud
tolmuvalmistamiseseadmed. Edasi järgneb katlatsehhi hoone.

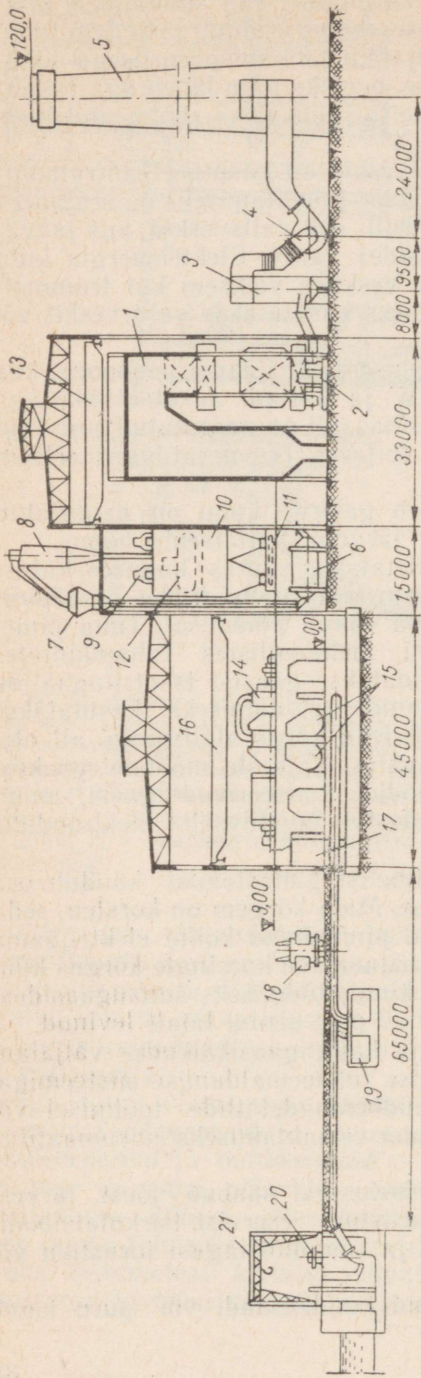
Võimsates elektrijaamades põletatakse suures koguses kütust
ja suitsugaasid võivad kanda atmosfääri palju tuhka ja väävli-
gaasi, mis tekib kütuses sisalduva väävli põlemisel. Tuha jämed-
dad fraktsioonid püütakse kinni mehaanilistes tuhapüüdjates
(tsüklonites, milles lendtuhk eraldatakse gaasist tsentrifugaaljõu
toimel). Peenemate tuhafraktsioonide eraldamiseks kasutatakse
elektrifiltreid, kus suitsugaasid läbivad kõrge alalispinge all ole-
vate elektrodide vahelise elektrivälja. Väikeste mõõtmetega kõr-
gepingelised negatiivsed elektrodid ioniseerivad gaasi, andes
talle negatiivse laengu. Tuhk sadestub positiivsetel elektroodidel
ja eemaldatakse perioodiliselt.

Ent ka pärast sellist kaheastmelist puhastamist kandub osa
peeneid tuhafraktsioone korstnasse. Mida kõrgem on korsten, seda
vähem tuhka langeb territooriumi pinnaühiku kohta elektrijaama
ümbritsevas rajoonis. Suurte elektrijaamade korstnate kõrgus küü-
nib 150—300 m. Seadmed väävli kinnipüüdmiseks suitsugaasidest
on keerulised ja kallid, mistõttu nad pole senini laialt levinud.

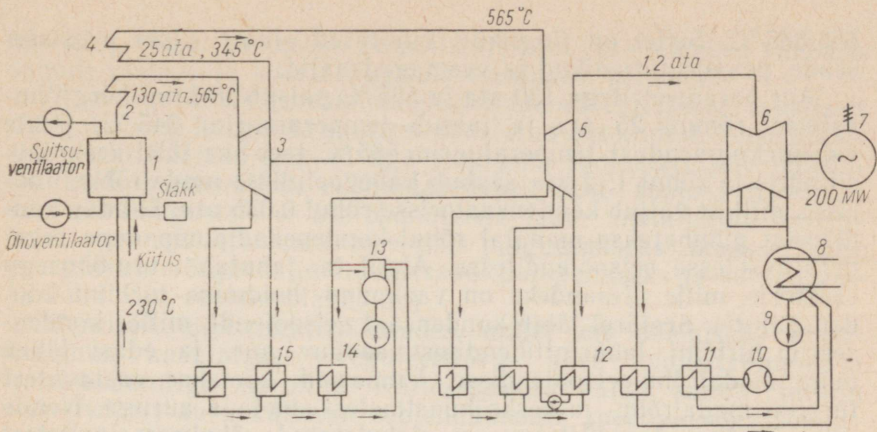
Koldekambris eralduv šlakk ja katla gaasikäikudes väljalan-
gev tuhk eemaldatakse hüdraulilise tuhaeemaldamise süsteemiga.
Juhul kui tuhka kasutatakse raudbetoondetailide tootmisel või
muuks otstarbeks, kasutatakse tuha eemaldamiseks pneumaatilisi
või mehaanilisi süsteeme.

Turbiinide kondensaatorite jahutusvesi saabub jõest, järvest
või mõnest muust tehnilise veevarustuse reservist tsirkulatsioon-
pumpade toimel torustiku kaudu ja suundub tagasi torustiku või
lahtise kanali kaudu.

Elektrijaamades on vältimatud kondensaadi või auru kaod,



Joon. 16. Elektriijaama peahoone 200-MW turbiinidega ja katelagregaatidega 640 t/h: 1 — katelagregaat; 2 — õhuventilaator; 3 — elektrifilter; 4 — suitsuventilaator; 5 — veski kivisööe jahvatamiseks; 6 — veski kivisööe jahvatamiseks; 7 — toimu separaator; 8 — tsüklon; 9 — kivisööe lintransportöör; 10 — kivisööepunker; 11 — kivisööe sötija; 12 — deaeraator; 13, 16 — sildkraana; 14 — turbogeneraator; 15 — kondensaator; 17 — omatarbejaotusseade; 18 — trafo; 19 — jahutusvee väljaviigu kanalid; 20 — tsirkulatsioonipump; 21 — portaalkraana.



Joon. 17. 200-MW energiabloki põhimõtteline soojusskeem: 1 — katelagregaat tootlikkusega 640 t/h; 2 — esimene ülekuumendi; 3 — turbiini kõrgrõhusilinder; 4 — vaheülekuumendi; 5 — turbiini keskrõhusilinder; 6 — turbiini madalrõhusilinder; 7 — elektrigeneraator; 8 — kondensaator; 9 — kondensaadi pump; 10 — ežektor; 11 — tihendiauru eelsoojendi; 12 — madalrõhu-eelsoojendi; 13 — deaeraator; 14 — toitepump; 15 — kõrgrõhu-eelsoojendi.

mis kondensatsioonjaamades küünivad 2—3% -ni. Need kaod kaetakse keemiliselt puhastatud lisavee andmisega katelde toitesüsteemi. Kaasaegsed kõrgelt forsseeritud katelagregaadid nõuavad kõrge kvaliteediga toitevett. Mitmesuguste soolade, mehaaniliste lisandite ja hapniku sisaldused ei tohi ületada teatavaid normatiivseid väärtusi. Nimetatud normid on eriti ranged katla rõhu puhul üle 100—140 ata. Toitevee vajaliku kvaliteedi tagamiseks on elektrijaamas spetsiaalne vee ettevalmistuse sisseseade. Tavaliselt kasutatakse soolade ja teiste lahustuvate lisandite lisaveest eemaldamiseks keemilist meetodit. Kõige efektiivsemalt saab soolasisaldada ionitvaikude abil. Ülekriitilise rõhuga seadmetes puhastatakse sooladest ka kondensaati, sest kondensaatori ebatiheiduste kaudu on võimalik jahutusvee juurdeimemine, mis sisaldab palju sooli ja mehaanilisi lisandeid.

Elektrijaamade soojusmehaanilise sisseseade koosseis ja auru ning kondensaadi voolud on näitlikult kujutatavad soojusskeemil, kus tingmärkidega on näidatud katlamaja, turbiinisaal ja abiseadmed. Kaasaegse elektrijaama täielik soojusskeem sisaldab tuhandeid erinevaid põhi- ja abiseadmete tingmärke, mida ei ole võimalik kujutada ühel joonisel kõigis detailides. Seepärast saab anda vaid põhimõttelise soojusskeemi; detailsed aurutorustike, toitetorustike, dreanaazide jne. skeemid koostatakse aga eri joonistena.

Joonisel 17 on esitatud põhimõtteline soojusskeem blokile turbiiniga 200 MW ja katlaga 640 t/h auru parameetritega 130 ata,

565/565 °C. Sellel on tinglikult kujutatud ainult bloki peasisseade, peaaurustorustikud ja veemagistraalid.

Aur parameetritega 130 ata ja 565 °C paisub turbiini kõrgrõhuastmes rõhuni 25 ata ja jahtub temperatuurini 345 °C. Peale vaheülekuumendust temperatuurini 565 °C teeb aur tööd keskrõhusilindris ja rõhul 1, 2 ata saabub kahevoolulisse madalrõhusilindrisse, millest väljub kondensaatorisse rõhul 0,035 ata. Saadav kondensaat pumbatakse madalal rõhul kondensaadipumpadega regeneratiivsetesse eelsoojenditesse. Algul ta jahutab auruõhusegu ežektoris, mille ülesandeks on vaakuumi hoidmine turbiini kondensaatoris. Seejärel läbib kondensaat eelsoojendi, milles kondenseerub turbiini labürinttihenditest saabuv aur, ja edasi läheb nelja madalrõhu-eelsoojendisse. Viimaseid köetakse vastavatest turbiini madalrõhu- ja keskrõhuastmetest saadava auruga. Nende eelsoojendite torusüsteem on valmistatud õhukeseseinalistest messingitorudest, mis tagab väikese temperatuuridevahe küttauru ja soojendatava kondensaadi vahel.

Seejärel saabub kondensaat deaeraatorisse (vees lahustunud gaaside eemaldamiseks), kus ta täiendavalt soojeneb ja, nõrgudes alla mööda horisontaalsete vaheriulite kaskaadi, vabaneb hapnikust ja teistest lahustunud gaasidest. Edasi antakse kondensaat toitepumpadega kõrgel rõhul kolme kõrgrõhu-eelsoojendisse ja temperatuuril 230 °C saabub katlasse. Nende eelsoojendite torud on terasest ja arvestatud toitepumba poolt tekitatud rõhule.

Bloki skeemis on kaheastmeline aurustusseade, tootlikkusega 17 t/h destillaati, mis korvab kondensaadikadusid (3% üldisest turbiini aurukogusest).

Sellise 200-MW bloki üldine kasutegur parameetritel 130 ata, 565/565 °C küünib 37—38%-ni. Auru algparameetrite tõstmisel väärtusteni 160—170 ata, 565/565 °C, tõuseb kasutegur 39%-ni.

7. TERMOFIKATSIOONELEKTRIJAAAMADE SEADMESTIK

Elektrijaamades põletatakse katelagregaatides kütust suure kasuteguriga (85—90% ja rohkem). Elumajade ja kvartali katlamajade katelde kasutegur on tunduvalt väiksem. Veel väiksem on kasutegur kütuse põletamisel ahjudes. Linnade kütmine on majanduslikult kasulik termofikatsioonijaamadest, kus aur algul teeb tööd turbiinis ja seejärel kuumutab vett, mida kasutatakse hoonete kütteks.

Termofikatsioonielektrijaamades toodetakse kombineeritult elektrienergiat ja soojust (auru näol tööstuslikuks ja kommunaalseks tarbimiseks ja kuuma veena kütte otstarbeks). Sellisel elektrienergia ja soojuse kombineeritud tootmisel õnnestub kasutada kuni 70—75% kütuse põletamisel vabanevast soojusest, samal ajal kui kondensatsioonielektrijaamades muutub elektrienergiaks

30—40% kütuse soojusest. Termofikatsiooni rakendamisel väheneb samuti majade ja kvartali katlaid teenindav personal.

Kaasaegsed kondensatsioonielektriijaamad ehitatakse tavaliselt märgatavasse kaugusse suurtest asustatud punktidest. Termofikatsioonielektriijaamad peavad aga paiknema soojustarbijate läheduses (tööstusettevõttes, elumumassiivid), sest soojuse transport suurtele kaugustele ei ole ökonoomne (suur metallikulu torustikele, suur mullatöömaht torustiku paigutamiseks maasse, suur energiakulu võrguvee ja kondensaadi pumpamiseks ja suured soojuskaod läbi soojusisolatsiooni).

Termofikatsioonielektriijaamades, millel on peamiseks küttekoormus, kasutatakse reguleeritava auru vaheltvõtuga ja kondensaatoriga turbiine. Küttesessiooni vältel annab turbiin vaheltvõtust auru küttevee soojendamiseks spetsiaalsetes soojusvahetites (boilerites) ja toodab ühtlasi elektrienergiat. Ülejäänud aastaajal võib säärane turbiin töötada hariliku kondensatsiooniturbiinina. Vaheltvõtust saadava auru rõhk on 1,2—2,5 ata.

Tehnoloogiliste protsesside jaoks tööstusettevõtetes vajatakse auru rõhul 5 kuni 15 ata ja rohkem. Termofikatsioonielektriijaamades kasutatakse tehnoloogiliste tarbijate varustamiseks turbiine tööstusliku reguleeritava vaheltvõtuga (7—18 ata) ja kondensaatoriga turbiine või vasturõhuturbiine (ilma kondensaatorita). Tehnoloogilise ja küttekoormusega termofikatsioonielektriijaamades kasutatakse kahe reguleeritava auru vaheltvõtuga (7—13 ja 1,2—2,5 ata) turbiine, kui küttekoormus on aastaringne. Tuleb arvesse ka kaht tüüpi turbiinide kasutamine: ühed tööstusliku auru vaheltvõtuga ja teised kütteauru vaheltvõtuga.

Üldkasutatavaid termofikatsioonielektriijaamu (asutuse varustamiseks soojusega ja eluhoonete kütmiseks) hakati esmakordselt ehitama NSV Liidus. Esimene säärane jaam ehitati Leningradis 1924. aastal.

Praegusel ajal kuulub NSV Liidu elektriijaamade kogu võimsusest termofikatsioonielektriijaamade arvele umbes 30%.

Aastal 1935 hakati Leningradis Kirovi tehases tootma termofikatsiooniturbiine võimsusega 2500 ja 4000 kW ja Leningradi Masinatehases võimsusega 12 000 kW tööstusliku auru vaheltvõtuga 6 ata ja vasturõhuga 1,2 ata. Aastal 1933 valmistati Leningradi Masinatehases termofikatsiooniturbiin reguleeritava vaheltvõtuga 1,2—2 ata. See oli maailma suurim termofikatsiooniturbiin. Seejärel alustas tehas turbiinide tootmist tööstuslikule vaheltvõtule 7 ata ja aastal 1940 laskis välja turbiini 50 000 kW tööstusliku vaheltvõtuga 7 ata. Mõlemad turbiinid töötasid auruga parameetritel 29 ata, 400 °C.

Sõjajärgsel perioodil töötati välja termofikatsiooniturbiinide seeria võimsustele kuni 50 MW kütteauru ning tööstusliku auru vaheltvõtuga ja samuti ka vasturõhule, millel auru algparameetrid olid 90 ata, 500 °C. Auru algparameetrite tõstmisega suure-

neb termofikatsioonelektrijaamas elektrienergia toodang ühe toodetud soojuseühiku kohta. Mida suurem on elektrienergia erikaal, seda ökonoomsem on jaam.

Praegusel ajal toodetakse suure võimsusega termofikatsiooniturbiine Turbomootorite tehases. Aastal 1960 laskis see tehas välja turbiini võimsusega 50 MW kütteauru vaheltvõtuga ja 1961. a. sama tüüpi turbiini võimsusele 100 MW auru algarvmetritega 130 at, 565 °C.

Termofikatsioonelektrijaamade võimsuse kasvuga kaasneb kütusekulu suurenemine ja esinevad raskused kütuse toimetamisel linna piirides asuvasse jaama. Suurenevad ka jaama korstnatest väljuva tuha ja väävligaasi kogused, mis saastavad linna õhku. Seetõttu ehitatakse suure võimsusega termofikatsioonelektrijaamad linnade äärde ja paljudel juhtudel ka väljapoole linnapiire, mistõttu pikenevad soojusvõrgud. See on seotud metallikulu ja üldiste kapitalimahutuste suurenemisega soojusvõrkude ehitamiseks. Paljudel juhtudel osutub kahetoolise soojusvarustuse süsteemi asemel otstarbekaks ühetooline süsteem, mille puhul termofikatsioonelektrijaamast tarbijani läheb ainult üks toru ja võrgu vesi ei pöördu jaama tagasi. Sääraseid ühetoolise soojusvarustuse süsteemiga jaamu võib ehitada linnast kuni 30—50 km kaugusele.

Tulevikus võib osutada ökonoomselt soodsaks ainult suure võimsusega termofikatsioonelektrijaamade ehitamine, mis paigutatakse linnadest suurde kaugusesse ja kasutatakse ühetoolist süsteemi. Võrgu vett pole tarvis lasta kanalisatsiooni, vaid kasutada kasvumajade kütteks ja muudeks põllumajanduse vajadusteks. Sel juhul alaneb elektrienergia ja soojusenergia hind ning tõuseb kütuse soojuse kasutustegur. See tegur väljendab kütuse soojuse osa, mis muudetakse elektri- ja soojusenergiaks. Kaasaegsetes termofikatsioonelektrijaamades küünib see tegur 70—75% -ni ja tulevikus võib kasvada kuni 80—90%.

8. MILLISEKS KIJUNEVAU AURUTURBIINIDEUA ELEKTRIAAMAD TULEVIKUS?

Mööduuud aastakümnete kogemustele tuginedes on energeetika eriti kiiresti arenema hakanud viimase 20—30 aasta vältel. Suurenevad turboagregaatide ja elektrijaamade võimsused, kasvavad auru algarvmetrid, väheneb kütuse erikulu, suureneb töömahukate protsesside mehhaniseerimise aste ja elektrijaama kõigi agregaatide juhtimise automatiseerimise aste. Selle tulemusel vähenevad elektrijaama ehitamise kapitalimahutused, eksploatatsiooni-personali suhteline arv ja toodetava elektrienergia ja soojusenergia omahind.

Millistes suundades ja milliste piirideni võib tulevikus areneda auruturbiinidega elektrijaamade sissesead?

Vaatleme järgnevalt selle probleemi mõningaid aspekte.

TURBOAGREGAATIDE PIIRVÕIMSUSED

Bloki katel-turbiin võimsuse suurenemisega kaasneb elektrijaama ökonoomiliste näitajate paranemine: vähenevad kapitalimahutused ja metallikulu, vähenevad suhteliselt peahoone kubaatuur ja teenindava personali hulk, kütuse erikulu ning elektrienergia ja soojusenergia omahind.

Elektrijaamade projekteerimisel ei saa aga suurendada turboagregaatide võimsust meelevaldselt. Võimsuse valik põhineb võimalike ja otstarbekohaste variantide tehnilis-ökonoomilistel võrdlustel. Arvestatakse, et mida suurem on turboagregaadi võimsus, seda suurem peab olema võimsuse reserv süsteemis tema avariilise väljalülitamise juhuks. Peetakse otstarbekaks, et kõige suurema turboagregaadi võimsus ei tohi ületada 8—10% süsteemi üldisest võimsusest, sest suurema võimsuse puhul oleks raske tagada elektrivõrgu töö stabiilsust turboagregaadi väljalülitamise puhul avariitõttu. Turboagregaatide võimsusega 500 MW võib järelikult kasutada energosüsteemides võimsusega 5 milj. kW ja agregaatide võimsusega 1000 MW süsteemis 10 milj. kW.

NSV Liidus on loodud energiasüsteemid ja nende ühendused, kuhu võib planeerida turboagregaatide võimsusega 1000 MW ja rohkem.

Turboagregaadi piirvõimsust limiteerivad ka konstruktiivsed võimalused. Ühevõllilise turbiini maksimaalne võimsus sõltub esmajärjekorras viimase astme laba võimalikust pikkusest ja väljavoolude otstarbekast arvust (madalrõhusilindritest), mis määrab kindlaks tehnilis-ökonoomilistest kaalutlustest lähtudes vastuvõetava turboagregaadi üldpikkuse.

Tänapäeval on Nõukogude Liidus valmistatud ühevõlliline turbiin võimsusega 500 MW, auru algrõhuga 240 ata, pöörlemiskiirusega 3000 p/min, viimase astme laba pikkusega 1050 mm ja nelja väljalasuga kondensaatorisse (kaks kahevoollulist madalrõhusilindrit). Turboagregaadi pikkus koos elektrigeneraatoriga on 47,3 m. Projekteeritakse ühevõllilist turbiini võimsusega 800 MW.

USA-s on ühevõlliliste turbiinide maksimaalseks võimsuseks 420 MW, 3600 p/min, 170—247 ata, viimase labaga umbes 720 mm ja nelja väljalasuga kondensaatorisse. Inglismaal on võimsaim ühevõlliline turbiin 500 MW, 162 ata, 3000 p/min, viimase astme labaga 940 mm ja kuue väljalasuga kondensaatorisse (kolm kahevoollulist madalrõhusilindrit). Prantsusmaal on välja töötatud ühevõlliline turbiin auru algrõhule 166 ata, võimsusega 600 MW, 3000 p/min, viimase astme labaga 1000 mm ja kuue väljalasuga

kondensaatorisse (kolm kahevoolulist madalrõhuastet). Turbiini pikkus ilma elektrigeneraatorita on 33 m ja ta kaalub 1250 t ehk 2,1 kg/kW.

Turbiini viimase astme laba pikkus on määratud tema mehaanilise tugevusega. Mida pikem on laba, seda suurem on ta kaal ja seda rohkem on pingestatud laba metall ketta pöörlemisel tekkivate tsentrifugaaljõudude toimet. Ühtlasi mõjuvad labale auru voolust põhjustatud paindejõud, mis samuti tekitavad pingeid laba metallis. Laba pikkuse suurendamine on seotud astme keskmise läbimõõdu suurenemisega (ringi läbimõõt, mis vastab poolele laba kõrgusest), sest astme aerodünaamiliste tingimuste kohaselt peab laba kõrguse ja keskmise ringjoone läbimõõdu suhe olema kindlates piirides. Keskmise ringi läbimõõdu suurendamine turbiini antud pöörlemiskiirusel viib ringkiiruse suurenemisele, mis samuti suurendab tsentrifugaaljõust tingitud pinget labas.

Pöörlemiskiirusel 3000 p/min on raske konstrueerida laba pikkusega üle 1000—1100 mm, mis rahuldaks mehaanilise tegevuse tingimusi.

Pöörlemiskiirusel 1500—1800 p/min on võimalik laba pikkust viia kuni 1200—1300 mm. Ent väiksema kiirusega turbiinid osutuvad massiivsemateks; seetõttu neid tänapäeval ei kasutata.

Teine moodus viimase astme laba pikkuse suurendamiseks seisneb terase asendamises mõne teise metalliga, mis oleks piisava tugevusega ja väiksema erikaaluga. Sel juhul väheneb laba kaal, millega kaasneb ka tsentrifugaaljõust tingitud pingete vähene-mine. Reas maades tehakse uurimistööd suure pikkusega labade konstruktsioonide loomiseks titaani sulamite baasil, mis on väga tugevad ja suhteliselt väikese erikaaluga. Titaani sulamitest valmistatud 1300—1500 mm pikkuste labade kasutamisel võib ühevõllilise turbiini võimsust tõsta vastuvõetava väljalasete arvu juures kuni 1000—1500 MW. On võimalik veel üks tee ühevõllilise turbiini piirvõimsuse suurendamiseks — kasutada madalrõhu osas veeauru asemel teiste vedelikkude aurusid — ammoniaaki, freooni jt. Ammoniaagi (NH_3) auru rõhk on temperatuuril 25°C lähedane 1 ata samal ajal, kui vee auru rõhk on 0,03 ata. Freooni-12 (CCl_2F_2) auru rõhk on temperatuuril 25°C mõni atmosfäär. Ammoniaagi ja freooni auru erimaht on samal temperatuuril mitu korda väiksem veeauru erimahust. See võimaldab kasutada turbiini viimastes astmetes ka lühemaid labasid. Energeetikute kongressil USA-s 1961. a. teatas firma «Worthington» esindaja projek-teerimistöödest 250 MW võimsusega turboagregaadi loomiseks, mille madalrõhuosa (50 MW) on arvestatud töötamiseks freooni-12 aurudel. Agregaadi säärane skeem vähendab viimaste astmete labade kõrgust ja võimaldab saavutada kondensaatoris sügavamalt vaakuumi.

Madala keemistemperatuuriga vedelikkude aurude kasutamise

idee ei ole uus. Juba XIX sajandil rakendati Saksamaal, Inglismaal ja Prantsusmaal mitmesilindrilisi kolbaurumasinaid, mille madalrõhusilindrites kasutati vääveldioksiidi (SO_2), etüüleetri ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$) ja teisi aurusid.

Freoonid ja ammoniaak on laialt kasutusel külmutustehnikas. Selliste vedelikkude aurude kasutamine kaasaegsetes suure võimsusega auruturbiinides on tehniliselt teostatav. Kahe-kolme või enama madalrõhusilindri asemel on sel juhul üks silinder suhteliselt väikeste labadega, milles tööd teeb ammoniaagi või freooni aur. See aur saadakse tavalise auruturbiini keskrõhusilindrist saabuva ja aurustis kondenseeruva veeauru soojuse arvel. Ühevõllilise turboagregaadi võimsus võib säärase skeemi korral küündida 2000 MW ja rohkem.

Nagu juba märgitud, on tänapäeval ehitatud ühevõlliliste turbiinide maksimaalne võimsus saavutanud piirid 400—500 MW ja ehitatakse juba seadmeid võimsusele 600—800 MW. Ehitatud kahevõlliliste turbiinide võimsus on piirides kuni 800—1000 MW. Leningradi Masinatehases ehitatud kahevõllilise 800-MW turboagregaadi pikkus (koos generaatoriga) on kõrgrõhuvõllil 46 m ja madalrõhuvõllil 40 m. Ühevõllilise konstruktsiooni puhul ületaks säärase agregaaadi pikkus 70 m. Ühevõllilise 615-MW agregaaadi pikkus Cardinali (USA) elektrijaamas on 60 m. Sellise agregaaadi paiknemisel risti masinasaaliga oleksid saali laius ja kraana siila pikkus liiga suured. Seetõttu tuli agregaat paigutada piki masinasaali, mis aga raskendab saali ja seadmete üldkujundusele sobiva lahenduse leidmist ja halvendab elektrijaama peahoone ökonoomilisi näitajaid, sest tekib mittevastavus katel-agregaatidele ja turbiinile vajalike hoone sektsioonide laiuste vahel.

800—1500-MW võimsusega ühevõlliliste turbiinide baasil võib luua kahevõllilisi turbiine võimsusega 1500—3000 MW. Madalrõhusilindrites võib freooni aurude kasutamisel kahevõlliliste turbiinide piirvõimsus küündida kuni 4000 MW. Seega ühe- ja kahevõlliliste turbiinide loomise tehnilised võimalused lubavad tulevikus ehitada elektrijaamu võimsusega 6000—12000 MW nelja bloki puhul ja 9000—18000 MW kuue bloki puhul ühes elektrijaamas.

Elektrigeneraatorite loomisel võimsusele 1000 MW ja rohkem tekivad suured konstruktiivsed raskused, samuti on raskusi katel-agregaatide loomisel turbiinidele võimsusega 1000—1200 MW. Võimalik, et ka madalrõhusilindrid turbiinidele 1500—2000 MW ja nende turbiinide juurde kuuluvad elektrigeneraatorid osutuvad kaalult ja gabariitidelt raudteel mitte transporditavateks. Sel juhul ei ole välistatud teiste transpordiseadmete (näiteks helikopterite) kasutamise võimalus nende agregaatide toimetamisel tehastest elektrijaama montaaživäljakule.

Katelagregaadi vajalik aurutootlikkus on blokile 300 MW 950 t/h, blokile 500 MW 1700 t/h ja blokile 1500 MW 4800 t/h. Selliste võimsate katelagregaatide konstrueerimisel esinevad suured raskused. Kolde frondi laius osutub mittepiisavaks, et mahutada põleteid, kolde seinte pindalast ei piisa ekraanide ärapaigutamiseks, et tagada vajalik gaaside jahutus, raske on tagada ka soojusvastuvõtu ühtlust kogu kolde ja konvektiivsete gaasikäikude laiuse ulatuses.

Vajalik gaaside jahtumine koldes saavutatakse kahepoolsete ekraanidega või katelagregaadi jagamisega frondi laiust pidi kaheks osaks (kahekorpuseline konstruktsioon). Kodumaised katelagregaadid tootlikkusega 950 t/h on blokkidele 300-MW turbiiniga kahekorpuselised.

Katlaehitajad on käesoleval ajal loomas töökindlaid ühe korpuselise katelagregaatide blokkidele 300 ja 500 MW. Suurema võimsusega blokkidele nähakse ette lähemas tulevikus kahekorpuselised konstruktsioonid, mis ühekorpuselistega võrreldes vajavad rohkem metalli. Blokkidele võimsusega 1500—2000 MW puuduvad senini veel küllaldaselt detailselt läbitöötatud katelagregaatide projektid. Ei ole välistatud võimalus kasutada kaksiblokkiskeemi (kaks katelt ühe turbiini kohta), kui peaksid ilmnema ületamatud raskused selliste üliwõimsate katelagregaatide loomisel monoblokkidele (üks katel ühe turbiini kohta).

VEEAURU RINGPROTSESSIDE PIIRKASUTEGUR

Auru ringprotsessi kasutegur suureneb auru algrõhu ja algtemperatuuri suurendamisel ja auru lõpprõhu (rõhk kondensaatoris) vähendamisel. Lõpprõhu optimaalne väärtus 0,03—0,05 ata) oleneb eeskätt kondensaatori jahutusvee aasta keskmisest temperatuurist.

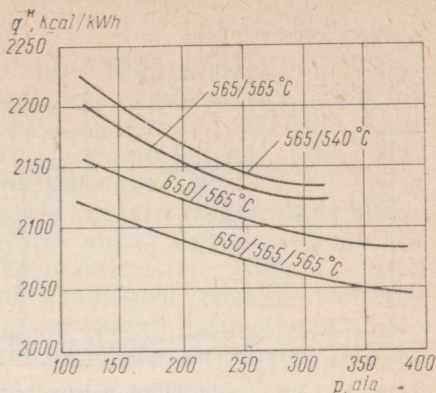
Auru algrõhu tõstmine põhjustab märgatavat seadme kasuteguri tõusu diapasonis 130—170 ata. Edasine rõhu tõstmine 170-lt kuni 250 ata-ni vähendab soojuse erikulu vaid 1,4—1,6%. Auru algtemperatuuri tõstmisega 540-lt kuni 565 °C väheneb soojuse erikulu 1—1,5%. Auru vaheülekuumendus annab soojuse ökonoomiat kuni 3—4% ja teine vaheülekuumendus — kuni 1,5%.

Soojuse brutoerikulu ilma energia arvestamiseta, mis on vajalik bloki katel-turbiin abimehhanismide käitamiseks, määratakse võrrandiga

$$q^{br} = \frac{860}{\eta_{el}\eta_k} \text{ kcal/kWh,}$$

kus η_{el} on kasutegur generaatori klemmidel;
 η_k — katelagregaadi kasutegur.

Joon. 18. Auruturbiinseadme soojuse erikulu sõltuvus auru algparameetritest.



Suurust $\eta_{\text{ök}}^{\text{br}} = \eta_{\text{el}} \eta_{\text{h}}$ nimetatakse bloki katel-turbiin ökonoomiliseks brutokasuteguriks.

Bloki netokasutegur (arvestades energiakulu abimehhanismidele)

$$\eta_{\text{ök}}^{\text{netto}} = \eta_{\text{ök}}^{\text{br}} \eta_{\text{ot}}$$

Tegur η_{ot} arvestab energiakulu osa bloki abimehhanismide käitamiseks (omatarve):

$$\eta_{\text{ot}} = 1 - \alpha,$$

kus α — see osa bloki võimsusest (energiakulust), mis kulub omatarbeks (kui $\alpha = 5\%$, siis $\eta_{\text{ot}} = 1 - 0,05 = 0,95$).

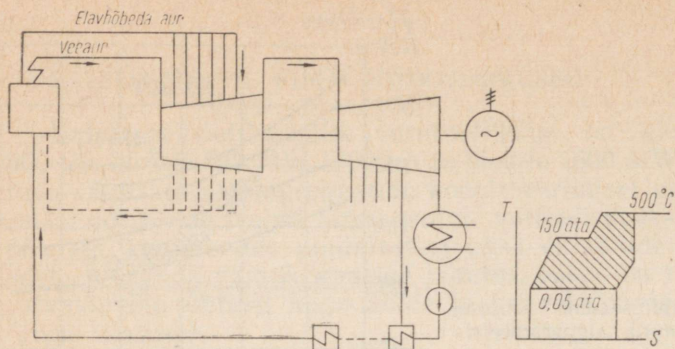
Kaasaegsetes, suure võimsusega elektrijaamades $\alpha = 3-5\%$. Vähem täiuslikes jaamades ja madala kvaliteediga kütuse puhul $\alpha = 6-7\%$.

Bloki soojuse netoerikulu

$$q^{\text{netto}} = q^{\text{br}} / \eta_{\text{ot}}$$

Joonisel 18 on näidatud bloki katel-turbiin soojuse erikulu sõltuvus algrõhust ja auru algtemperatuurist ühe ja kahe vaheülekuumenduse rakendamisel. Arvutused on tehtud eeldusel, et rõhk kondensaatoris on 0,035 ata ja katla kasutegur 90%.

Rõhu tõstmine 250-lt kuni 300—400 ata vähendab soojuse erikulu suhteliselt vähe. Ent auru rõhu tõstmine kuni 300—400 ata ja rohkem koos samaaegse auru temperatuuri tõstmisega kuni 650 °C ja kahekordse vaheülekuumendusega vähendab soojuse erikulu märgatavalt. Praegusel ajal auru parameetrid 300—400 ata, 650—700 °C ei õigusta end majanduslikult, sest saavutatav kütuse sääst ei kompenseeri sisseseade kallinemist. Tulevikus, kus bloki võimsus tõuseb 1000—1500 MW ja üle selle ning austeniittraste hind langeb, õigustavad säärsed auru algparameetrid end ka ökonoomiliselt.



Joon. 19. Auru isotermilise paisumisega ringprotsessi soojuskeem ja T - s -diagramm.

Kahekordse auru vaheülekuumenduse kasutamine muudab peaaurutorustikud kallimaks, sest aurutorustikud turbiinist teise vaheülekuumendini ja tagasi on suhteliselt madala rõhu tõttu jämedad ja pikad. Nende aurutorustike suur maht muudab keeruliseks ka turboagregaadi reguleerimissüsteemi. Eelistatavam oleks vaheülekuumendus turbiini vahetus läheduses, millega langeks ära vajadus pikkade ja suure läbimõõduga aurutorude järele. Võimalik on vaheülekuumendus kõrgemat keemistemperatuuri omavate vedelikkude aurudega (elavhõbeda aur, naatriumi ja teiste vedelmetallide aurud) või vedelikega, mis on kuumutatud kõrge temperatuurini (näiteks soolad). Selliseid vahesoojuskandjaid kuumutatakse katla gaasikäikudes ja nad annavad ära oma soojuse aurule vaheülekuumendis, mis paikneb masinasaalis.

Tulevikus ei ole välistatud võimalus auru isotermilise paisumisega ringprotsessi kasutamiseks (joon. 19), mille kasutegur läheneb Carnot' ringprotsessi kasutegurile. Säärase ringprotsessi võib realiseerida auru kuumutamisel vahesoojuskandjaga turbiini diafragmadest (näiteks kasutades elavhõbeda auru). Vahesoojuskandja võtab soojuse vastu katlagregaadi gaasikäikudes ja annab selle ära veeaurule turbiini kõrgrõhusilindri astmete diafragmadest, millega saavutatakse veeauru isotermiline paisumine.

Arvutused näitavad, et säärase veeauru isotermilise paisumisega seade võimaldab soojuse kokkuhoidu 13–14%, võrreldes tavalise seadmega (auru algparameetrid 150 ata, 500 °C).

Praegusel ajal on saavutatud blokkide ekspluateerimisel auru parameetritega 130–160 ata, 565/565 °C ökonoomilise netokasuteguri väärtuseks 37–38%. Loodetakse kasutegurit tõsta kuni 39%. Blokkidel 247 ata, 565/565 °C loodetakse saavutada kasuteguriks 39,5–40%. Senini on USA-s kogemused blokkidega 500 MW auru parameetritega 247 ata, 565/565 °C. Nende arvutuslik kasutegur on 40%. Ekspluatatsioonis on saavutatud kasuteguri väärtuseks 38–39%.

Elektrijaamadele blokkidega auru algparameetritel 300—350 ata, 650/565/565 °C on arvutuslik kasutegur 41—42%. Senini on suurim kasutegur, väärtusega 40%, saavutatud 325-MW blokil Eddystone'i elektrijaamas auru parameetritega 350 ata, 650/565/565 °C, kusjuures arvutuslik kasutegur on 42%.

Toodud arvud näitavad, et tavaline veeauru ringprotsess kõiki-del lähemas tulevikus saavutatavatel auru algparameetritel ja kahekordse vaheülekuumenduse kasutamisel ei võimalda tõsta kasutegurit üle 42%. Elektrijaama kasuteguri edasine tõstmine toimub nähtavasti kombineeritud ja teiste uute termodünaamiliste ringprotsesside kasutamisega, mida käsitleme järgmistes peatük-kides.

AURUTURBIINIDEGA ELEKTRIJAAMADE PIIRVÕIMSUSED

Eeltoodust nähtub, et on olemas tehnilised võimalused luua ühevõllilisi auruturbiine võimsusega kuni 1000—1500 MW ja kahe-võllilisi kuni 2000—3000 MW. Elektrijaamade projekteerimisel nähakse tavaliselt ette mitte üle 6—8 bloki. Kui lähtuda nendest arvudest, siis auruturbiinidega elektrijaama piirvõimsus võib saavutada väärtused 6—12 milj. kW. Praegusel ajal tuleb aga piirata elektrijaama võimsust suurusega 2—3 milj. kW. Elektrijaama võimsus on limiteeritud terve rea teguritega — kütuse juurdeveo ja tuha ning šlaki eemaldamise võimalustega, veevarustuse allika olemasoluga, atmosfääri paiskuvate kahjulikkude ainete kogusega jne.

Kütuse juurdevedu. Kütuse (antratsiidi puru) kulu elektrijaamas võimsusega 2,4 milj. kW on 880 t tunnis, 17 600 t ööpäevas ja 6 milj. t aastas. Elektrijaama peab saabuma kütust 15 vagunit tunnis (mahtuvusega 60 t) ja 300 vagunit ööpäevas. Pruunsöe põletamisel on aastane kütusekulu veelgi suurem — 12 milj. t.

Sellise kütusekoguse juures on otstarbekohane ehitada elektrijaamu kivisöe leiukohtade lähedusse. Elektrijaama paiknemisel šahti vahetus läheduses võib kivisöe toimetamiseks elektrijaama kasutada transportööre või vaguneid elektrijaama omal raudteeharul. Mõeldav on ka kivisöe kohaletoimetamine hüdrotranspordiga (mööda torusid spetsiaalsete pumpade poolt tekitatava vee vooluga).

Elektrijaama paiknemisel kaugel kütuse leiukohast veetakse kütust vagunitega üldkasutataval raudteel. Mida suurem on kaugus kütuse leiukohast elektrijaama, seda suuremad on kulutused transpordile. Kauguse puhul 500 km on kulutused 1 tonni ting-kütuse transpordiks umbes 1 rubla kivisöe korral ja umbes 1,1 rubla loodusliku gaasi korral. Kauguse puhul 3000 km on transpordikulud vastavalt ligikaudu 6 rubla ja 8 rubla. Kõrge tootmis-hinnaga Donetsi või Petšoori kivisöe (umbes 10 rbl/t) transport

3000 km kaugusele tõstab elektrienergia hinda ligikaudu 45%, samale kaugusele odava loodusliku gaasi (1,5—2 rbl/t) transport suurendab elektrienergia hinda umbes 2,5 korda.

Elektrijaamade projekteerimisel tuleb optimaalne variant valida tehnilis-ökonomiliste arvutuste alusel — kütuse transport suurematele kaugustele või elektrijaama viimine kütuse leiukoha lähedusse, millega kaasneb elektrienergia andmine suurtele kaugustele. Sõltuvalt elektrijaama võimsusest, tema sisseseade maksumusest, kütuse transpordi tingimustest, kütuse kütteväärtusest ja tema hinnast kaevanduses võib saada erinevad tulemused selliste variantide tehnilis-ökonomilisel võrdlemisel.

Võimsuse puhul 6 milj. kW ja kõrgekvaliteedilise kütuse korral osutub näiteks elektrienergia ülekanne kasulikumaks kauguste puhul üle 1000 km. Madalakvaliteedilise kütuse puhul võib elektrienergia ülekanne õigustada end juba kauguste puhul 500—600 km.

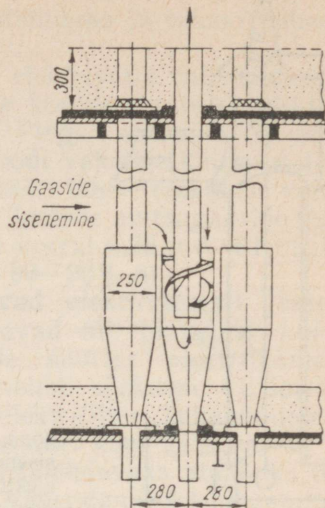
Elektrijaama võimsuse valikul on vaja arvestada seda, et kasutada oleks vajalik pind. Elektrijaama enda paigutamiseks on võimsuse puhul 2,4 milj. kW vaja 30—40 ha. Peale selle on vaja umbes 2000 ha elamurajooni ehitamiseks.

Šlaki- ja tuhaeraldus. Osa põletatava kütuse tuhast eraldub koldes šlakina ja osa lendtuha eraldub katla gaasikäikudes. Ülejäänud osa tuhast kantakse suitsugaasidega katelagregaadi piiridest välja ja eraldatakse osaliselt tuhaeraldusseadmetes.

Šlaki ja tuha kogused, mis tuharikaste kütuste põletamisei eraldatakse suure elektrijaama katelagregaatidest ja tuhaeraldajatest, ulatuvad tuhandetesse tonnidesse ööpäevas ja mõne aasta vältel koguneb neid miljonid tonnid. Elektrijaamale võimsusega 2,4 milj. kW on vaja tuhaväljaku jaoks 40—50 ha. Tavaliselt kasutatakse tuhaväljakuks maastiku soostunud alasid ja alasid süvendite ja karjääridega.

Atmosfääri saastumine. Elektrijaama võimsuse kasvamisel muutub teravaks probleemiks õhuhasseini kaitsmine lendtuha ja väävligaasiga saastumise vastu. Sanitaarnormide kohaselt ei tohi kahjulike ainete kontsentratsioon atmosfääris ületada järgmisi suurusid (milligrammides kuupmeetri kohta): tuhk — 0,15, tahm — 0,05, väävligaas — 0,15. Elektrijaamade projekteerimisel nähakse ette abinõud atmosfääri heidetavate tuha ja väävligaasi koguste piiramiseks suurusteni, mis tagaksid sanitaarnormidest kinnipidamise. Peamisteks vahenditeks on suitsugaaside puhastamine ja kõrgete korstnate kasutamine, millega vähendatakse kahjulikkude ainete kontsentratsiooni maapinna lähedal.

Elektrijaam paigutatakse lähima asustatud punkti suhtes allatuult (arvestades rea aastate vältel esinenud valitsevat tuule suunda). Elektrijaama ja eluhoonete vahele jäetakse sanitaarkaitsetsoon. Kütuse tuhasisalduse juures 15—20% ja kütusekulu puhul 300 t/h (elektrijaama võimsus umbes 1 milj. kW) peab selle tsooni laius olema vähemalt 1 km, kui puhastusseadmetes eraldatakse



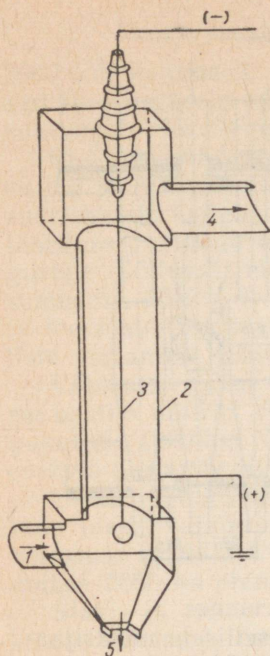
Joon. 20. Patareitsükloni skëem.

vähemalt 90% kütuse tuhast. Korstna kõrgus sellisele elektrijaamale peab vastavalt normidele olema vähemalt 150 m. Linna piirides asuvates termofikatsioonelektrijaamades on kohustuslikuks seade suitsugaaside puhastamiseks väävlioksiididest juhul, kui põletatakse väävliirikast masuuti (väävliisaldusega 3—4,5%) ja kütuse kulu on üle 100 t/h.

Lenttuhk eraldatakse suitsugaasidest (enne suitsuventilaatorit) mehaanilistes tuhapäädjates, märg-tuhapäädjates või elektrofiltrites.

Mehaanilises tuhapäädjas (tsüklonis) toimub tuhaosakeste eemaldamine suitsugaasidest tsentrifugaaljõu toimele, mis tekib gaasivoolu pöörisliikumisest tsükloni sisemisele torule paigutatud juhtpindadel (joon. 20). Tsentrifugaaljõud on seda suurem, mida väiksem on tsükloni läbimõõt. Seetõttu kasutatakse mõnesajast tsüklonist (läbimõõduga 150—250 mm) koostatud patareisid, mis on paigutatud ühisesse keresse. Liikudes tsüklonis alla mööda spiraalset trajektoori, vabanevad gaasid enamikust tuhaosakestest, pöörduvad seejärel 180° võrra ja eemalduvad, liikudes keskmist toru mööda üles. Separeeritud tühk pudeneb punkrisse. Sellistes patareitsüklonites eraldatakse kuni 70—75% tuhast, mis saabub tuhapäädjasse gaasidega.

Tuha ja väävligaasi eemaldamiseks kasutatakse märg-tuhapäädjaid. Inertstüüpi märg-tuhapäädjas juhatakse suitsugaasid vertikaalse silindrilise korpuse alumisse ossa puutuja sihis ja nad läbivad selle spiraalse trajektooriga, väljudes seejärel tuhapäädja laes olevast avast. Korpuse keskel on düüsidega toru, millest pihustatakse radiaalsuunas vett tuhapäädja kogu kõrguse ulatu-



Joon. 21. Torutüüpi elektrifiltri skeem: 1 — gaaside sisenemine; 2 — sadestuselektrood; 3 — koroneeriv elektrood; 4 — gaaside väljumine; 5 — tuha eemaldamine.

ses. Veepiisad püüavad kinni tuhaosakesi ja väevligaasi. Vesi väljub tuhapüüdja põhjast, kandes endaga kaasa kinnipüütud tuhka ja väevlit. Märg-tuhapüüdjates püütakse kinni kuni 95% tuhka. Elektri ja amades ei ole sellised tuhaeemaldajad leidnud laialdast kasutamist. Nende puuduseks on suitsugaaside jahtumine, tugev korrosioon veetraktis, trakti saastumine ja vajadus vett puhastada enne tema laskmist kanalisatsiooni.

Kõige efektiivsemaks tuha püüdmise seadmeks loetakse elektrifiltrit. Suitsugaasid läbivad elektrifiltri elektrodide vahelise elektrivälja kuiva kivisöe põletamisel kiirusega 1,5–1,8 m/s ja niiske kivisöe puhul kuni 2,5–3 m/s. Elektrodidevaheline elektrivälj tekitatakse kõrge alalispingega — kuni 70–90 kV.

Toruelektrifiltris (joon. 21) on traadist elektrod ühendatud elektri ahela negatiivse poolusega ja teda nimetatakse koroneerivaks elektrodiks, sest tema pinnal toimub suitsugaase ioniseeriv koroonalahendus. Gaasi negatiivsed ioonid annavad negatiivse laengu tuhaosakestele, mis elektrostaatiliste jõudude toimel liiguvad positiivsele toruelektroodile ja jäävad selle pinnale. Elektroodi 2 nimetatakse sadestuselektroodiks, sest tema pinnale sadeneb põhiline osa eraldatavast tuhast. Väike osa tuhaosakestest omandab positiivse laengu ja sadeneb koroneerival elektroodil. Mõnikord on koroneeriv elektrood ka lindikujuline ja sadestuselektrood plaadikujuline. Tuha kiht elektrodidel vähendab gaase läbiva voolu tugevust. Seetõttu on elektrifiltrid varustatud sead-

mega elektrootide perioodiliseks raputamiseks ja tuhasta puhastamiseks.

Elektrifiltri töö efektiivsus sõltub elektrivälja intensiivsusest, mis on määratud pinge suurusega ja koroneerivatesse elektrootidesse juhitava voolu tugevusega. Pinge suurus on umbes 3,6 kV koroneeriva ja sadestuselektroodi vahelise kauguse 1 cm kohta. Kõrgema pinge kasutamisel esineks lühise tekkimise võimalus. Voolu tugevuseks võetakse niiske kivisöe suitsugaaside puhul 0,5 mA ja kuiva kivisöe suitsugaaside korral 0,25 mA. Elektrifiltrite arvutuslik tuhapüüdetegur ulatub 90—98% -ni.

Mehaanilised tuhapüüdjad eraldavad efektiivsemalt jämedamaid tuhaosakesi, elektrifiltrid eraldavad nii jämedaid kui ka peeni osakesi. Seetõttu kasutatakse suurtes elektrijaamades suitsugaaside puhastamisel kaheastmelist süsteemi. Esimeseks astmeks on patarei tsüklon ja teiseks elektrifilter. Tuhapüüdetegur küünib sääraстал kombineeritud süsteemidel kuni 99% -ni.

Korstna kõrguse suurendamine on täiendavaks abinõuks tuha ja väevligaasi kontsentratsioonide vähendamiseks maapinnal. Mida suuremad on gaaside kiirus ja temperatuur korstnast väljumisel, seda kõrgematesse atmosfäärikihtidesse nad paiskuvad ja seda väiksem on kahjulikkude ainete kontsentratsioon maapinnal. Gaaside kiirus korstnast väljumisel küünib kuni 30—35 m/s, suure võimsusega elektrijaamade korstnate kõrgus ületab 250—300 m.

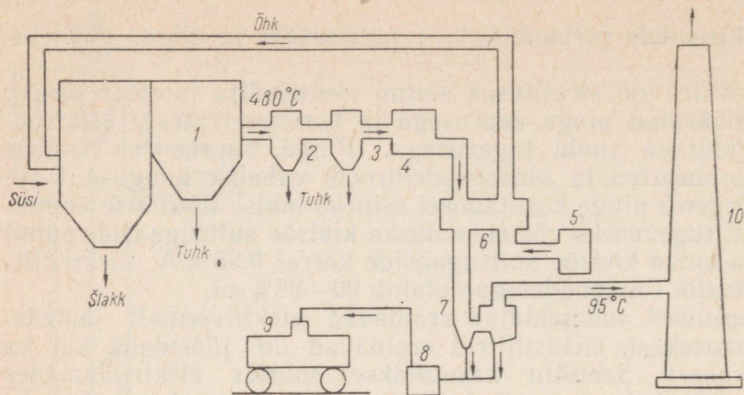
Suitsugaaside puhastamiseks väevlist on välja töötatud mitu meetodit, ent veel ei ole loodud ühtki seadet, mis oleks küllalt lihtne ja odav laialdaseks kasutamiseks elektrijaamades.

Ammoniaagimeetodi kasutamisel tuleb suitsugaasid eelnevalt jahutada temperatuurini 35 °C ja seejärel pesta ammooniumsulfiti ja -vesiniksulfiti lahusega, mis saadakse ammoniaagi lahuse küllastamisega vääveldioksiidiga. Reaktsiooni saadustest võib eraldada vääveldioksiidi ja väävli. Säärane seade osutub keeruliseks ja vajab palju vett.

Lubjameetod põhineb vääveldioksiidi neutraliseerimisel leeliga — lubjaga. Selles protsessis läheb vääveldioksiid kaotsi ja teda ei saa hiljem kasutada. Lubja kulu on suur — kuni 15—20% kütuse kaalust. Ekspluatatsioonikulud on suured ja menetlus ebaökoonoomne.

Odavamaks osutub magneesiummenetlus. Reagentiks kasutatakse odavat magneesiumoksiidi, mille kulu on väike. Saadav magneesiumsulfaat laguneb ahjus kuumutamisel magneesiumiks ja vääveldioksiidiks, mida võib kasutada väävelhappe tootmiseks. Vajalik on aga sel juhul elektrijaama juurde väävelhappetehase ehitamine, sest madala kontsentratsiooniga vääveldioksiidi transport suurtele kaugustele on ebaökoonoomne.

USA-s on projekteeritud Keystone'i elektrijaamale (kaks blokki à 900 MW; 277 ata, 538/538 °C), mis põletab aastas 5,6 milj. t



Joon. 22. Seadme skeem vääveldioksiidi püüdmiseks: 1 — katelagregaat; 2 — patarei-tuhapüüdja; 3 — elektrifilter; 4 — konverter; 5 — õhuventilaator; 6 — regeneratiivne õhuelsoojendi; 7 — vääveldioksiidi elektrostaatiline sadesti; 8 — pump väävelhappe pumpamiseks; 9 — väävelhappetsistern; 10 — korsten.

kivisütt, suitsugaaside vääveldioksiidist puhastamise seade. SO_2 eemaldamiseks muudetakse ta katalüüsi teel SO_3 -ks järgneva kondenseerimisega väävelhappeks. Kui elektri jaama võimsus on 1 milj. kW ja väävlisisaldus kivisöes 3%, osutub väävelhappe tootmise hind selle meetodi rakendamisel madalamaks turuhinnast. Lahkuvatesse suitsugaasidesse jääb 0,0002 osa vääveldioksiidi, mis on 10 korda vähem kui elektri jaamades ilma väävliist puhastuseta. Seadme skeem on toodud joonisel 22. Katelseadme koldes põletatakse kivisütt, mis sisaldab 3% väävli ja 18% tuhka. Suitsugaasid puhastatakse lendtuhast patareitsüklonis ja elektrifiltris ja läbivad seejärel konverteri. Edasi jahtuvad gaasid regeneratiivses õhuelsoojendis temperatuurini 95°C , andes oma soojust õhule. Elektrostaatilises sadestis langevad välja väävelhappe piisad. Kogujatest pumbatakse hape tsisternidesse.

Teistes projektides on vääveltrioksiidi (SO_3) eemaldamiseks elektrostaatiliste sadestite asemel ränioorgaanilistest ühenditest filtrid. Säärast skeemi soovitatakse kasutada masuudikutega katelagregaatides.

Otstarbekohasemaks osutub masuudi puhastamine väävliist tsentraliseeritud korras nafta ümbertöötamistehastes ja juba puhastatud masuudi andmine elektri jaamadesse. Siis ei ole vaja komplitseerida elektri jaama skeemi täiendava sisseseadega vääveldioksiidi eemaldamiseks. Võimalik, et tulevikus hakatakse kivisütt väävliist puhastama kivisöe rikastamise vabrikutes eeldusel, et see osutub majanduslikult tulusaks.

Kuni kütust hakatakse tsentraliseeritud korras puhastama tema tootmise ja ümbertöötamise kohtades, tuleb elektri jaamades võim-

susega üle 2,5—3 milj. kW ette näha seadmed vääveldioksiidi eemaldamiseks, kui kütus on väävlirikas.

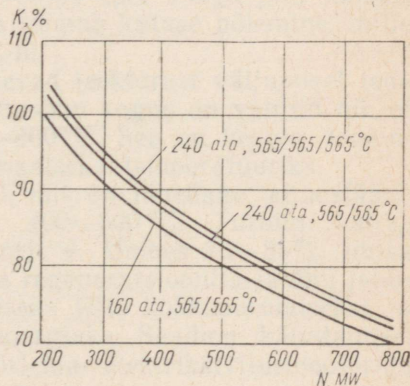
Veevarustus. Suure võimsusega elektrijaamad vajavad suures koguses vett tehniliseks otstarbeks — peamiselt kondensaatorite jahutamiseks. Kondensaatori vaakuum sõltub jahutusvee temperatuurist ja kogusest. Ühe kg auru kondenseerimiseks vajatakse 50—70 kg jahutusvett. Elektrijaamades võimsusega 2,5 milj. kW on kondensaatorite jahutusvee kulu 90 m³/s. Võrdluseks võib meenutada, et Kaširi linna juures on Okaa jõe minimaalne veehulk 40—45 m³/s, s. o. kaks korda väiksem 2,5 milj. kW elektri- jaama veevajadusest.

Kui elektrijaam ehitatakse suure veevaruga jõe kaldale, siis kasutatakse veevarustuse otsevoolu süsteemi. Vesi võetakse jõest tsirkulatsioonipumpadega, ta läbib turbiinide kondensaatorid ja lastakse allpool uuesti jõkke. See on kõige odavam ja efektiivsem kondensaatorite jahutuse süsteem.

Vee vähesuse puhul jões kasutatakse jahutuse segasüsteemi. Jõest saadud värskete veele lisatakse osa kondensaatoreid läbinud veest ja segu suunatakse tagasi kondensaatorisse. Kondensaatorisse suubuva vee temperatuur on kõrgem jõe vee temperatuurist ja vaakuumi hoidmiseks tuleb suurendada jahutuskord- arvu või jahutada eelnevalt kondensaatorist väljuvat vett. Sää- rase segasüsteemi sisseseade maksumus on umbes 10% kõrgem kui otsevoolusüsteemil.

Mõnedes maades, eriti USA-s, on suured jõed ja järved juba elektri- jaamade veevarustuse allikatena ära kasutatud. Seetõttu on hakatud suure võimsusega uusi elektri- jaamu ehitama ookeani kallastele ja kasutatakse kondensaatorite jahutuseks merevett. Tavaliselt kujuneb mereveega veevarustussüsteemide maksumus kõrgemaks.

Loomulike veevarustuse allikate (suurte jõgede, järvede) puu- dumisel kasutatakse kondensaatorite jahutamiseks ringlusega süsteeme. Otsevoolu jahutussüsteemi puhul hoitakse turbiini kon-



Joon. 23. Kapitalimahutuste vähenemine olenevalt bloki võimsusest.

densaatorites vaakuum 0,03—0,035 ata. Ringlusega süsteemide kasutamisel tuleb hoida väiksem vaakuum (0,05 ata), sest ehitiste maksumus on suur ja vee temperatuuri ning jahutuse kordarvu ei õnnestu saada sellistes suurustes, nagu otsevoolusüsteemide puhul. Ringlusega süsteemides läheb vesi turbiini kondensaatoritest jahutustiikidesse, piserdusbasseinidesse või gradiiridesse jahutuseks.

Ehitiste maksumus ringlusega süsteemidel on 20—40% kõrgem kui otsevoolusüsteemidel. Veehoidla (jahutustiigi) pindala elektriijaamale võimsusega 2,5 milj. kW on 2000—2500 ha.

Käesolevas paragrahvis toodust nähtub, et on palju tegureid, mis limiteerivad soojuselektriijaama piirvõimsust. Sellegipoolest jääb soojuselektriijaamade ökonoomsuse edasisel tõstmisel põhiliseks suunaks elektriijaama ja turboagregaatide võimsuse suurendamine.

Bloki võimsuse suurendamisel väärtuselt 200 MW kuni 800 MW väheneb elektriijaama peahoone ehituskubatuur kolmekordselt ja peahoone pindala kahekordselt. Vastavalt vähenevad ka peahoone maksumus ja metalli kulu.

Üldine installeeritud võimsuse 1 kW maksumus väheneb bloki võimsuse suurendamisel samuti tunduvalt (joon. 23). Kõrgemate auru algparameetrite puhul osutub installeeritud võimsuse 1 kW maksumus kõrgemaks. Mõningal määral tõstab maksumust ka auru teise vaheülekuumenduse kasutamine.

Bloki võimsuse suurenemisega kaasneb auru algparameetrite tõus ja bloki soojusskeemi täiustamine. Bloki võimsuse kasvuga väheneb kütuse erikulu ja samuti eksploatatsioonipersonali arv. Selle tulemusel väheneb elektriijaama võimsuse kasvamisest mitte üksnes installeeritud võimsuse 1 kW maksumus, vaid ka iga toodetud kilovatt-tunni omahind. Seetõttu võib eeldada soojuselektriijaamade piirvõimsuse edasist suurenemist.

II peatükk

GAASITURBIIN- JA DIISELELEKTRIJAAMADE SISSESEADE

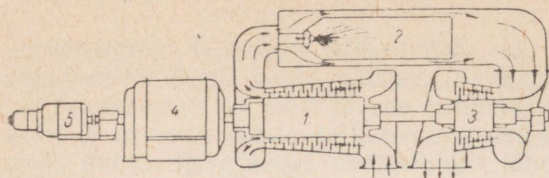
Gaasiturbiini võimsus ei ületa tänapäeval 25—30 MW, diiselmootori võimsus 20—25 MW. See tingib nende kasutamise võimaluse ainult väikese ja keskmise võimsusega elektrijaamades. Praegusel ajal luuakse lihtsustatud gaasiturbiinseadmete konstruktsioone võimsusega kuni 50—100 MW kasutamiseks suurtes elektrijaamades tippkoormust kandvate agregaatidena (tasakaalustavad elektrijaama ööpäevase koormuse ebahütlust). Gaasiturbiine kasutatakse ka gaasi magistraaljuhtmete kompressorite käitamiseks ja nafta magistraalitorustike pumpade käitamiseks. Samuti on hakatud neid kasutama mitmesugustes tööstusettevõtete tehnoloogilistes protsessides (keemiatööstus, metallurgia).

1. GAASITURBIINI JA DIISELMOOTORI EHTITUSE NING TÖÖTAMISE PÕHIMÕTTED

Lihtsaima, avatud tsükliga gaasiturbiinseadme ehituse skeem on antud joonisel 24. Kompressor 1 imeb atmosfäärist õhku ja surub selle kokku rõhuni 3—5 ata. Kokkusurumise protsessis õhk soojeneb teatava temperatuurini vastavalt kokkusurumise astmele ja saabub põlemiskambrisse 2. Osa õhku antakse põlemiskambrisse läbi vedelat kütust (solaarõli, masuut) pihustava pihusti registri, suurem osa õhust aga voolab läbi rõngaspilu kambri seinte ja leektoru vahel. Leektorus toimub kütuse põlemine, mille juures temperatuur ulatub 1800 °C-ni.

Kütuse põlemissaadused segunevad leektorust väljumisel teda väljastpoolt jahutava õhuga. Jahutusõhu kogus on valitud nii, et segu temperatuur ei ületaks 600—800 °C. See on kestva teenindusperioodiga turbiinidele maksimaalseks temperatuuriks.

Turbiinis 3 paisub gaas rõhuni, mis on lähedane atmosfääri rõhule, omades lõpptemperatuuri 400—500 °C. Turbiin käitab kompressorit 1 ja elektrigeneraatorit 4. Umbes 75—85% lihtsa skeemiga turbiini võimsusest (ilma regeneratsioonita ja õhu jahutusega) kulub kompressori käitamiseks (õhu kokkusurumiseks) ja ainult 15—25% muundub elektrienergiaks. Seadme käivitamisel pannakse kompressori rootor pöörlema elektrikäivitusmootoriga



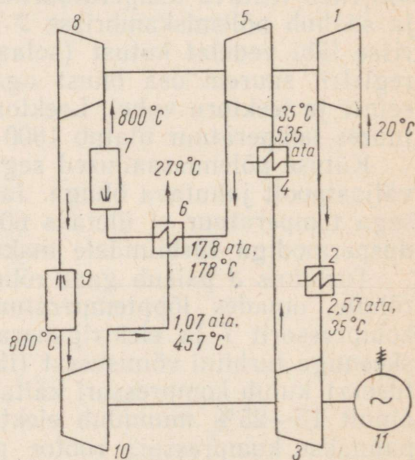
Joon. 24. Lihtsaim avatud skeemiga gaasiturbiin-seade.

5, mis saab voolu elektrivõrgust. Lihtsa skeemiga gaasiturbiin-seadme kasutegur ei ületa 15—25%. Sellist kasutegurit omavad auruturbiinidega seadmed parameetritel 30 ata, 400 °C.

Kõrgema kasuteguri võib saada keerukama soojusskeemiga gaasiturbiinseadme rakendamisel, milles kasutatakse soojuse regeneraatorit, jahutatakse õhku tema kokkusurumisel ja kasutatakse gaasi vaheülekuumendust tema paisumisel. Näitena on joonisel 25 toodud Harkovi Turbogeneraatorite Tehase 50-MW gaasiturbiinseadme skeem gaasi kahekordse kuumutusega, kolmekordse kokkusurumisega ja regeneratsiooniga.

Atmosfääriõhk surutakse kokku madalrõhukompressoris, jahutatakse vahejahutis, surutakse kokku keskrõhukompressoris, jahutatakse uuesti, surutakse kokku kõrgrõhukompressoris ja parameetritel 17,8 ata, 178 °C suundub regeneraatorisse ning seejärel kõrgrõhu-põlemiskambrisse. Põlemiskambrit liiguvad põlemissaadused temperatuuril 800 °C kõrgrõhuturbiini, millest väljuvad rõhul 5,46 ata ja temperatuuril 578 °C. Põlemissaadustes on piisavalt hapnikku kütuse põletamiseks madalrõhu-põlemiskambris, kust gaasid temperatuuril 800 °C suunduvad madalrõhuturbiini. Sealt nad suunduvad edasi regeneraatorisse, kus annavad ära osa soojusest ja temperatuuril 279 °C väljuvad korstnasse. Lahkuvate suitsugaaside soojuse utilisatsiooniate (soojuse regeneratsiooni aste) on 70%. Selle gaasiturbiinseadme kasutegur on 33,5%.

Joon. 25. 50-MW gaasiturbiinseadme skeem: 1 — madalrõhukompressor; 2, 4 — õhujahutid; 3 — keskrõhukompressor; 5 — kõrgrõhukompressor; 6 — regeneraator; 7 — kõrgrõhu-põlemiskamber; 8 — kõrgrõhuturbiin; 9 — madalrõhu-põlemiskamber; 10 — madalrõhuturbiin; 11 — elektrigeneraator.



Statsionaarsetes gaasiturbiinseadmetes kasutatakse tavaliselt õhu kokkusurumiseks kõrge kasuteguriga (85—90%) ja suure tootlikkusega telgkompressoreid.

Gaasiturbiinagregaadi efektiivne võimsus

$$N_e = N_i - N_h - N_m,$$

kus N_i on turbiini sisevõimsus;

N_h — kompressori käitamiseks kulutatud võimsus;

N_m — mehaanilised võimsuskaod.

Turbiini sisevõimsus

$$N_i = \frac{GH}{860} \eta_s,$$

kus G on gaasi kulu kg/h;

H — gaasi entalpia lang turbiinis;

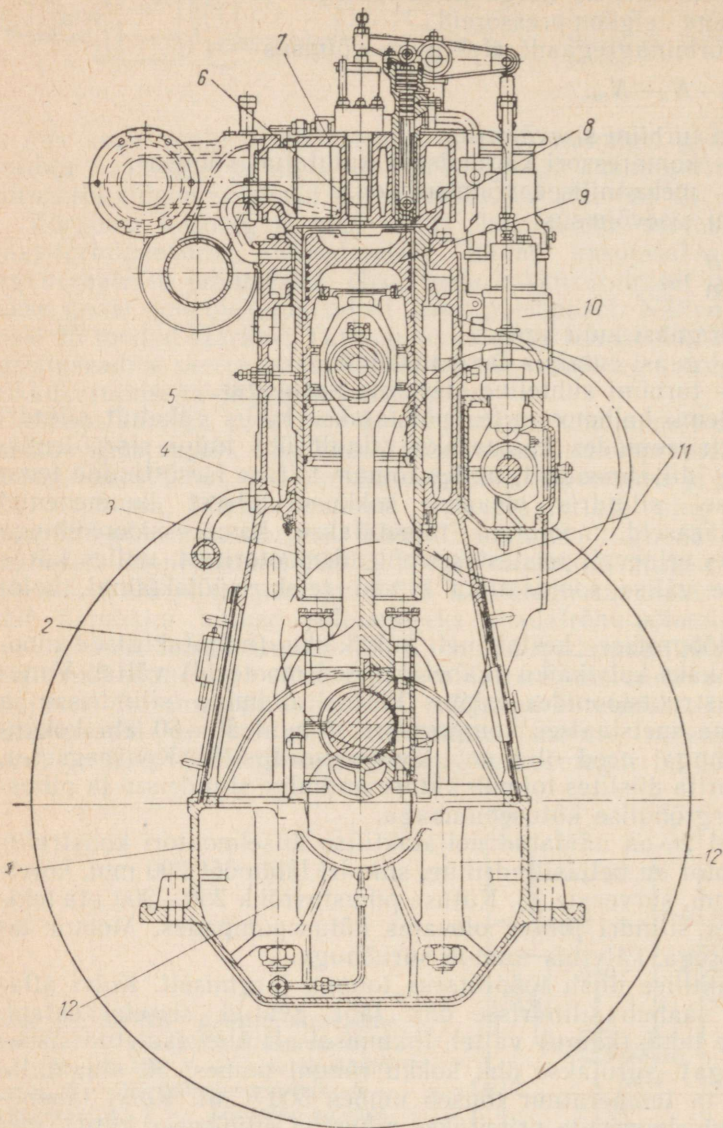
η_s — turbiini suhteline sisemine kasutegur.

Sisepõlemis-kolbmootorites põletatakse kütus vahetult silindri sees. Elektrijaamades kasutatakse ainult üht tüüpi sisepõlemismootorit — diiselmootorit, milles toimub kütuse isesüttimine tema pihustamisel silindris olevasse kokkusurumisest kuumenenud õhku. Sääraseid mootoreid nimetatakse kompressioonsüütega mootoriteks erinevalt teistest sisepõlemismootoritest, milles kütus süüdatakse välise soojusallika toimel (elektrisüüteküünal, kolorisaaator).

Diisli tööprotsess kestab neli kolvikäiku (neljataktilised mootorid) või kaks kolvikäiku (kahataktilised mootorid) vältel. Vanemates konstruktsioonides toimus kütuse andmine silindrisse ja pihustamine spetsiaalses kompressoris rõhuni 50—60 ata kokkusurutud õhuga: need olid nn. kompressordiislid. Kaasaegsetes, kompressorita diislites toimub kütuse andmine silindrisse ja pihustamine kõrgrõhulise kütusepumbaga.

Joonisel 26 on näidatud neljataktilise diiselmootori konstruktsioon. Mootor on neljasilindriline, silindri läbimõõt 290 mm, kolvikäik 415 mm, surveaste 13. Kütuse pihustusrõhk 250—300 ata tekitatakse iga silindri juures olevates kütusepumpades. Mootor on vesijahutusega, käivitus toimub suruõhuga.

Neljataktilise diisli tööprotsess toimub järgmiselt. Kolvi allaliikumisel saabub silindrisse õhk läbi avatud sisselaskeklapi. Kolvi teise takti (käigu) vältel, liikumisel alt üles (suletud sisselaskeklapiga), surutakse õhk kokku rõhuni umbes 30 ata, mille tulemusel ta temperatuur tõuseb umbes 500 °C-ni. Kolvi lähene-misel ülemisele seisule pritsitakse pihustist silindrisse kütus, mis süttib kokkupuutest kuuma õhuga. Umbes 40% kütusest põleb silmapilkselt (silindris maht ei jõua muutuda), ülejäänud osa põleb edasi kolvi allaliikumise algperioodil ja rõhk silindris jääb selle vältel peaaegu konstantseks. Kolvi kolmas takt on töötakt. Gaasid paisuvad silindris ja teevad kasulikku tööd, mis antakse



Joon. 26. Neljataktiline diisel: 1 — vundamendiraam; 2 — alumine kepsupea; 3 — silindri hülss; 4 — keps; 5 — ülemine kepsupea; 6 — pihusti; 7 — silindri kaas; 8 — käivituskapp; 9 — kolb; 10 — kütusepump; 11 — silindriplakk; 12 — ankrupoldid.

kolvilt edasi mootori völliile. Töötakti lõpus avaneb väljalaskeklapp ja neljanda takti vältel eemaldatakse põlemissaadused silindrist. Edasi ringprotsess kordub samas järjestuses. Kahetaktilise diisli tööprotsess toimub kahe kolvikäigu (takti) vältel. Sisse- ja väljalaskeklappide asemel on kahetaktilise mootori silindrites sisselaske- ja läbipuhumisaknad, mille kaudu kütuse põlemissaaduste eemaldamiseks ja silindri täitmiseks värske õhuga puhutakse läbipuhumispumbaga õhku rõhul 1,15—1,25 ata.

Kolvi alumise asendi juures on aknad avatud. Kolvi liikumisel üles toimub läbipuhumine, kuni kolb suleb väljalaskeaknad. Edasi algab silindrisse jäänud õhu kokkusurumine. Kui kolb läheb ülemisele seisule, toimub kütuse pumpamine ja pihustamine koos tema süttimisega. Algab kolvi töökäik alla. Kui kolb avab väljalaskeaknad, väljuvad töötanud gaasid. Seejärel avab kolb läbipuhumisaknad ja silindrit täitev õhk tõukab välja ülejäänud põlemissaadused.

Kahetaktilise mootori indikaatorvõimsus

$$N_i = \frac{p_i n}{60} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{S z}{75} \text{ hj,}$$

kus p_i on keskmine indikaatorrõhk silindris;

n — mootori pöörlemiskiirus;

D — silindri läbimõõt;

S — kolvikäik;

z — mootori silindrite arv.

Neljataktilise mootori võimsus on muude tingimuste samasuse korral kaks korda väiksem kahetaktilise mootori võimsusest.

Mootori efektiivne võimsus

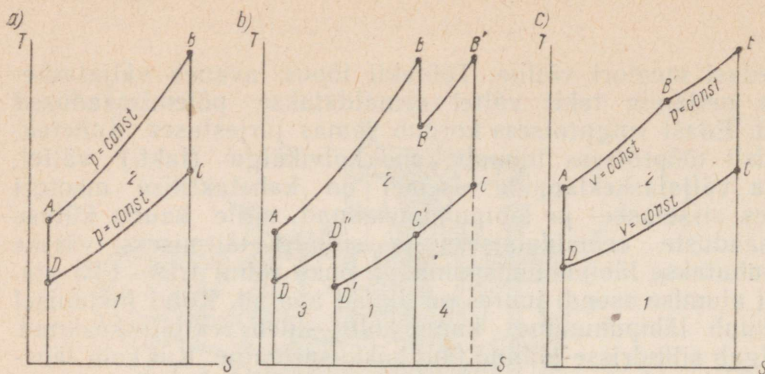
$$N_e = \eta_m N_i.$$

Enamiku sisepõlemismootorite mehaaniline kasutegur $\eta_m = 0,78—0,86$. Võimsatel eelkompressiooniga kahetaktilistel diiselmootoritel ulatub kasutegur kuni 0,90—0,92.

Keskmine indikaatorrõhk on eelkompressioonita neljataktilistel diiselmootoritel $p_i = 6,5—7,5 \text{ kg/cm}^2$, eelkompressioonita kahetaktilistel diiselmootoritel 5—6,5 ja eelkompressiooni kasutamisel 9—12 kg/cm^2 .

Silindrite arv on võimsatel aeglase käiguga diislitel 6—12, kolvi läbimõõt 89—90 cm, kolvikäik 160—180 cm, pöörlemiskiirus minutis 100—120 p/min, ühe silindri võimsus 2000—3000 hj. Selliste agregaatide üldine võimsus küünib kuni 12 000—36 000 hj.

Aeglase käiguga diislite efektiivne kasutegur on 35—42%, millele vastab kütuse erikulu 0,15—0,180 $\text{kg/hj} \cdot \text{h}$. Parematel eelkompressiooniga kahetaktilistel diiselmootoritel on kütuse erikulu vähendatud väärtuseni 0,140 $\text{kg/hj} \cdot \text{h}$. Eelkompressioon kuni 1,3—1,5 ata suurendab diiselmootori võimsust 20—60%, kõrge eelkompressioon (1,6—2,5 ata) suurendab võimsust 70—150%.



Joon. 27. Gaasiturbiinseadme ja diisli ringprotsessid: a — lihtsa skeemiga ühevõlliine gaasiturbiinseade; b — regeneratsiooniga, õhu jahutusega ja vahekuumendusega kahevõlliine gaasiturbiinseade; c — diisil.

Diiselmootori heitgaasidega läheb kütuse soojusest kaduma kuni 25—30%; kuni 30% soojusest läheb kaduma jahutusveega. Osa heitgaaside soojusest võib kasutada kuuma vee või auru tootmiseks utilisatsioonikatlas, millega suureneb kütuse kasutegur.

Gaasiturbiinseadmete ja diisli ringprotsessid on kujutatud joonisel 27. Lihtsa skeemiga gaasiturbiinseadme kasulikku tööd kujutab pindala 2 ja soojuskadusid (heitgaasidega atmosfääri väljuv soojus) pindala 1. Regeneratsiooniga gaasiturbiinseadme puhul kujutab pindala 3 soojuskadusid õhu jahutis.

Lihtsa gaasiturbiinseadme ringprotsessis kujutab joon DA õhu kokkusurumist kompressoris, joon AB — gaasi paisumist turbiinis ja joon CD gaaside väljalasku atmosfääri.

Kahevõlliilises seadmes on kokkusurumisprotsess kompressorites kaheastmeline ($D'D''$ ja DA), $D''-D$ — õhu jahutamine. Gaasi paisumine turbiinides on samuti kaheastmeline (BB' ja $B''C$), kus joon $B'B''$ kujutab gaasi vaheülekuumendust. Joon CC' kujutab soojusvahetust regeneraatoris ja joon $C'D'$ lahkvate gaasidega äraantavat soojust.

Diisli ringprotsessis kujutab joon AB' soojuse juurdejuhtimist gaasile jääval mahul ja joon $B'B$ — jääval rõhul. Joon BC vastab gaasi paisumisele, joon CD — soojuse väljajuhtimisele ja joon DA — õhu kokkusurumisele.

Suletud skeemiga gaasiturbiinseadmetes kasutatavad ringprotsessid on sarnased joonisel 27 toodutega. Töötava ainena võib neis kasutada õhku, lämmastikku, heeliumi. Soojuse juurdejuhtimine töötavale ainele ei toimu põlemiskambris, vaid katel-agregaadi koldes, mille torusüsteemis voolab töötav aine. Avatud skeemiga gaasiturbiinseadmetes kasutatakse senini ainult vedelat kütust ja looduslikku gaasi, suletud skeemiga seadmed võivad töötada ka tahkel kütusel.

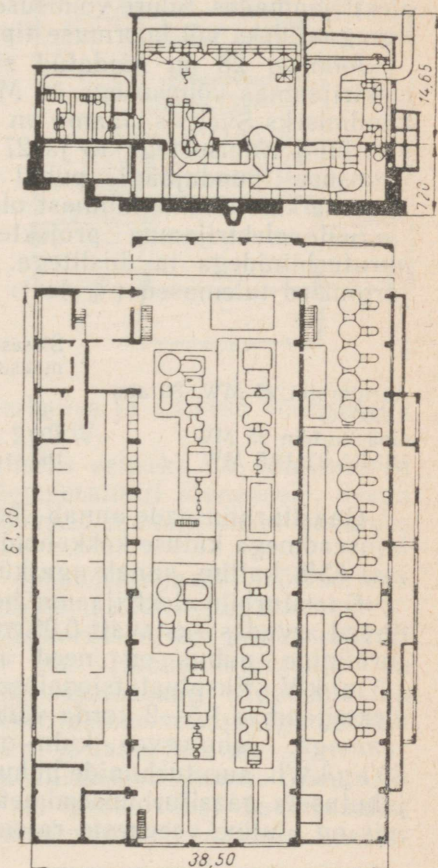
2. GAASITURBIIN- JA DIISELELEKTRIJAAAMAD

Mõte kasutada kuumi gaase mehhanismide käitamiseks tekkis palju sajandeid tagasi. Leonardo da Vinci kirjeldas aastal 1500 tõusva suitsugaaside voolu energiaga pöörlema pandavat vurri — gaasiturbiini prototüüpi.

Töövõimeliste gaasiturbiini konstruktsioonide loomine sai võimalikuks pärast metallurgia ja masinaehitustööstuse loomist ja pärast termodünaamika ning gaasidünaamika arengut.

Aastal 1897 ehitas vene insener P. D. Kuzminski gaasiturbiini, mis töötas petrooleumiküttel. Saksa insener Stolze ehitas aastatel 1900—1904 gaasiturbiine, mis töötasid põlemiskambri konstantsel rõhul. Rõhk põlemiskambris tekitati Stolze seadmetes kompressoriga ja Kuzminski seadmetes veeauruga, mis saadi põlemiskambri ekraanidest.

Aastal 1934 töötas professor V. M. Makovski välja gaasitur-



Joon. 28. Betznau (Sveits) gaasiturbiin-elektrijaam võimsusega 40 MW.

biini konstruktsiooni, mis oli ette nähtud töötamiseks Donbassi kivisöe maa-aluse gaasistamise gaasil. Gaasiturbiinide seeriatootmist alustati esimesena Rootsis.

Esimene sise põlemismootor, mis töötas raskel vedelkütusel (nafta) ning oli kompressioonsüütega, ehitati aastal 1888 Peterburi masinaehitustehases (praegune «Russki dizel»). Diesel ise ehitas mootoreid, mis töötasid kergel kütusel (petrooleum). Aastal 1898 ehitati Peterburi Putilovi tehases (praegune Kirovi tehas) G. V. Trinkleri projekti järgi esimene kompressioonsüütega kompressorita mootor. Tehase «Russki dizel» mootoris toimus kütuse pihustamine kompressorist saadava suruõhuga.

XX sajandi alguseks leidsid kompressioonsüütega mootorid laialdast kasutamist elektrijaamades ja jõe- ning meretranspordis. Agregaatide võimsused küündisid kuni 3000—6000 hj. Üksnes tehas «Russki dizel» tootis selliseid mootoreid aastaks 1913 üldvõimsuses 66 500 hj.

Kuni käesoleva ajani kasutatakse diisleid väikese võimsusega elektrijaamades. Suure võimsusega elektrijaamades on nad reserv-agregaatideks või koormuse tippude katmiseks.

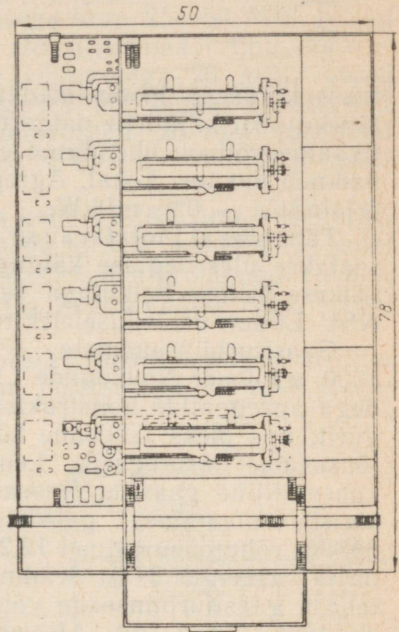
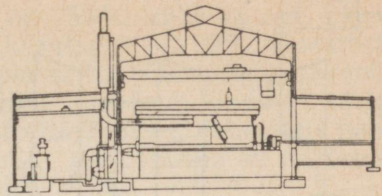
Joonisel 28 on näidatud sisseseade paigutus gaasiturbiin-elektrijaamas võimsusega 40 MW, mis on ehitatud tippkoormuse kandmiseks Šveitsis. Jaama on paigutatud kaks kahevõllilist gaasiturbiini võimsustega 13 ja 27 MW. Jaam võtab koormuse peale võimsuse puudujäägi puhul hüdroelektri jaamade süsteemis. Seadme käivitamine külmast olekust kestab 15 min.

Selle elektri jaama projekteerimisel vaadati läbi variandid auruturbiinidega ja diislitega. Nende variantide võrdlus andis järgmised tulemused (%-des):

	Sisseseade maksumus	Kasutegur
Auruturbiin 25 MW, 80 ata, 500 °C	98	29
Gaasiturbiin 25 MW	100	34
Diislid 2×12,5 MW	163	36,5

Gaasiturbiiniseade annab ühesuguse maksumuse puhul auruturbiinseadmega kütuse kokkuhoidu 15%. Diiselseade on gaasiturbiinist 63% kallim, annab aga kütuse säästu 7%.

Gaasiturbiin-elektri jaama hoone pindala ja kubatuur väljenduvad arvudes vastavalt 0,06 m²/kW ja 0,5 m³/kW, seevastu auruturbiinide puhul on need arvud 0,08—0,10 m²/kW ja 0,9—1,5 m³/kW. Eksploaatatsioonipersonali vajadus on gaasiturbiin-elektri jaamas 1,5—2 korda väiksem, võrreldes auruturbiin-elektri jaamaga. Jahutusvee kulu on gaasiturbiin-elektri jaamas 30—50 kg/kWh, auruturbiinide puhul aga 120—200 kg/kWh. Õhu vahejahutuseta gaasiturbiiniseadmetele pole jahutusvesi üldse vajalik, mis on oluline veevaeste rajoonide puhul. Metallikulu on gaasi-



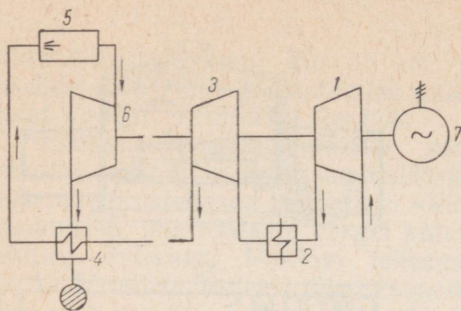
Joon. 29. Diiselektrijaam võimsusega 30,6 MW.

turbiinseadmetel 30—40 kg/kW, keskmise ja väikese võimsusega auruturbiinseadmetel aga 80—120 kg/kW.

Gaasiturbiin-elektrijaamade eriliseks eeliseks on võimsuse ja kasuteguri suurenemine välisõhu temperatuuri alanemisel. Seega on gaasiturbiinseadmed eriti ökonoomsed madala aasta keskmise temperatuuriga rajoonides.

Joonisel 29 on kujutatud diiselektrijaam võimsusega 30,6 MW, milles on kuus diiselgeneraatorit võimsustega à 5,1 MW. Mootorid on kahetaktilised, kümnecilindrilised, 167 p/min, silindri läbimõõt 736 mm, kolvikäik 1016 mm. Hoone eripindala on 0,1 m²/kW ja erimaht 1,25 m³/kW. Masinasaali üldpikkus on 78 m ja laius 50 m. Gaasiturbiin-elektrijaamas võimsusega 40 MW on vastavalt masinasaali pikkus 61 m ja laius 38,5 m.

USA-s on ka suure võimsusega diiselektrijaamu. Uhes säärases jaamas võimsusega 200 MW on igasse viiest masinasaalist monteeritud 40 kahte ritta paigutatud mootorit. Jaamas kasuta-



Joon. 30. 25-MW gaasiturbiinseadme soojusskeem: 1 — madalrõhukompressor; 2 — õhujahuti; 3 — kõrgrõhukompressor; 4 — regeneraator; 5 — põlemiskamber; 6 — turbiin; 7 — elektrigeneraator.

takse kütusena looduslikku gaasi. Mootorid on 12-silindrilised, tähekujulise silindrite paigutusega horisontaalpinnas. Mootori vertikaalne võll on ühendatud elektrigeneraatori võlli muhviga, mis paikneb mootori kohal. Agregaadi kõrgus on 5,5 m, masinasaali eripindala — 0,05 m²/kW.

Tänapäeval ehitatavasse tippkoormuse diiselelektrijaamadesse seatakse üles aeglase käiguga suure võimsusega diislid, mis on väikese kütuse erikuluga ja suhteliselt väikeste gabariitidega. NSV Liidus uusi diiselelektrijaamu ei ehitata.

Gaasiturbiinseadmete arengu esimesel perioodil (1945—1960. a.) loodi Nõukogude Liidus ja välismaal keeruliste skeemidega agregaatide konstruktsioone eesmärgiga saavutada kasutegurit, mis oleks lähedane kõrgete auru altparametritega aurujõuseadme kasutegurile. Leningradi Masinatehases on ehitatud kahevõlliline gaasiturbiinseade võimsusega 12 MW töötamiseks kivisöe maa-aluse gaasistamise baasil. Gaasi temperatuuril 650 °C, rõhutõusu astmel 12,2 ja regeneratsioonistme juures 80% on ta kasutegur 27%. Seadme mass on 75 kg/kW. Järgmine selle tehase gaasiturbiinseade võimsusega 25 MW on juba lihtsana skeemiga (joon. 30). Algtemperatuuril 700 °C, rõhutõusu astmel 10 ja regeneratsioonistmel 0,8 on ta kasutegur 28%. Seadme mass on 24 kg/kW. Seade on eksploatatsioonis Kiiemis. Selle seadme konstruktiivsete elementide baasil on projekteeritud kahevõlliline gaasiturbiinseade võimsusega 100 MW. Gaasi algtemperatuuril 750 °C, rõhul 19,3 ata ja regeneratsioonistmel 80% on seadme projekteeritud kasutegur 37%. Tehases on tehtud võrdlusarvutused elektrijaamale võimsusega 600 MW kuue sellise gaasiturbiinseadmega ja elektrijaamale auruturbiinidega 150 MW, 130 ata, 565/565 °C. Nettokasuteguri väärtused on mõlemal jaamal peaaegu võrdsed, sisseseade kaal on gaasiturbiin-elektrijaamal (koos elektrigeneraatoriga) 24 kg/kW, auruturbiinidega jaamal aga 43 kg/kW. Peahoone erikubatuur on gaasiturbiin-elektrijaamal 0,37 m³/kW, auruturbiinidega jaamal — 0,56 m³/kW.

Praegusel ajal valmistatakse Leningradi Masinatehases veel lihtsama skeemiga ja kergemat gaasiturbiinseadet võimsusega 100 MW. Seade on ette nähtud tippkoormuse kandmiseks ja tema üheks põhiliseks nõudeks on installeeritud võimsuse 1 kW mini-

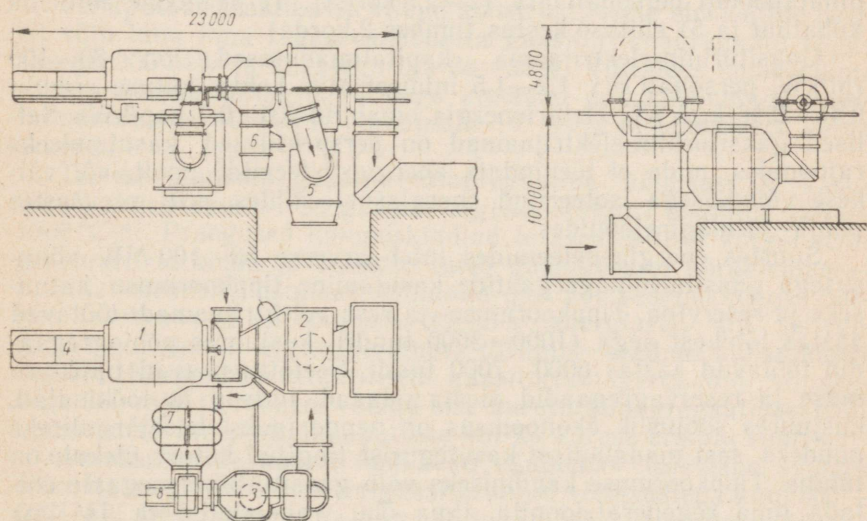
maalne maksimum. Algtemperatuur on 750 °C, rõhk 26 ata, gaasi vaheülekuumendus 750 °C. Seadme kasutegur on 30%. Gaasiturbiinseadme mass on 6,45 kg/kW, kuna sama võimsusega, regeneratsiooniga ja keerukama skeemiga seadme mass oleks 13,95 kg/kW. Harkovi Turbogeneraatorite Tehases valmistati gaasiturbiinseade võimsusega 50 MW, mille soojusskeem on näidatud joonisel 25. Seadme kaal on 13,1 kg/kW.

USA-s, Inglismaal, Prantsusmaal, Šveitsis ja Rootsis toodetakse gaasiturbiinagregaate võimsusega kuni 25–50 MW.

Kompanii «Electromechanique» (Prantsusmaa) lihtsa skeemiga ühevõlliline gaasiturbiinseade võimsusega 20 MW, gaasi algtemperatuuriga 730 °C ja rõhuga 5,2 ata omab kasutegurit 21,2%. Ühevõllilisi gaasiturbiine võimsusega 25 MW toodavad firmad «Siemens-Schuckert» (Saksa FV) ja «Westinghouse» (USA).

Firma «Fiat» (Itaalia) valmistab kahevõllilise ilma regeneratsioonita gaasiturbiinseadme võimsusega 42 MW, kahekordse gaasi kuumutusega ja õhu vahejahutusega. Gaasi algrõhk on 15 ata, temperatuur 732 °C ja kasutegur 27,8%. Seade kaalub 163 t. Gabariitmõõtmed on näidatud joonisel 31.

Rootsi firma «Stahl» valmistab aastal 1959 kolmevõllilise ilma regeneratsioonita gaasiturbiinseadme võimsusega 50 MW tööta-



Joon. 31. Firma «Fiat» (Itaalia) gaasiturbiinseade võimsusega 42 MW: 1 — elektrigeneraator; 2 — madalrõhu-turbokompressorite grupp; 3 — kõrgrõhu-turbokompressorite grupp; 4 — madalrõhuvõlli käivitusseade; 5 — madalrõhu-põlemiskamber; 6 — kõrgrõhu-põlemiskamber; 7 — õhujahuti; 8 — kõrgrõhuvõlli käivitusseade.

miseks kergel vedelkütusel. Töötamisel masuudiga on seadme võimsus 42,5 MW. Gaasi algtemperatuuril 710 °C ja rõhul 12 ata on kasutegur täiskoormusel 25,8% ja poolkoormusel 21%. Seadme käivitamiseks kulub 3,5 minutit.

Elektrijaamas «Port-Mann» (Kanada) on neli gaasiturbiin-agregaati võimsusega à 25 MW. Agregaadid on kahevõllilised, ilma regeneratsioonita, gaasi kahekordse kuumutamise kuni 620 °C ja õhu vahejahutusega. Kütuseks on looduslik gaas, reservkütuseks masuut.

Elektrijaam on täielikult automatiseeritud ja teda võib käivitada või seisata distantsjuhtimispuldist, mis asub elektrijaamast 25 km kaugusel. Agregaadid võtavad täiskoormuse peale 30 minutiga. Installeeritud võimsuse 1 kW maksumus on 126 dollarit, samal ajal kui sama võimsusega aurujõuseadmel see oleks 145 dollarit.

3. MILLISED ON TULEVIKU GAASITURBIINID

Praegusel ajal toodetavatel ja ekspuateeritavatel gaasiturbiin-agregaatidel võimsusega 10—25 MW on sama võimsusega auruturbiin-elektrijaamadega võrreldes väiksemad: 1) kapitalimahutused (20—25%), 2) metallikulu sisseadele (kuni 50%), 3) ekspuatsiooni personali arv (2—2,5 korda), 4) peahoone ehituslik kubatuur ja 5) ehituse kestus (umbes 2 korda).

Gaasiturbiin-elektrijaama kapitalimahutused on 80—100 rbl/kW, personali arv 1,2—1,5 inimest MW kohta, kütuse erikulu 0,45—0,46 kg/kWh, elektrienergia omahind 0,6—0,7 kop/kWh. Sellised gaasiturbiin-elektrijaamad on perspektiivsed kasutamiseks rajoonides, mida ei teenindata energiasüsteemide poolt, või väikese võimsusega isoleeritud energiasüsteemides, eriti veevaestes põhja- ja mägirajoonides.

Suurtes energiasüsteemides tuleb arvesse 50—100-MW võimsusega gaasiturbiin-agregaatide kasutamine tippkoormuse katmiseks ja reservina. Tippkoormuse- ja reservelektrijaamad töötavad aastas lühikest aega (1000—3000 tundi), kusjuures põhiagregaadid töötavad aastas 6000—7000 tundi. Seetõttu peavad tippkoormuse ja reservagregaadid olema odavad, lihtsad ja töökindlad, kusjuures soojuslik ökonoomsus on nende jaoks teisejärguliseks nõudeks, sest madalamast kasutegurist tingitud kütuse ülekulu on tühine. Tippkoormuse kandmiseks võib gaasiturbiin-agregaatide ehitada ilma regeneratsioonita, ilma õhu vahejahutuse ja ilma gaasi vahekuumutusega.

Inglismaal ja USA-s ehitatakse tippkoormuse elektrijaamu lennukite turbokompressor-agregaatide baasil. Selliseid agregaatide toodetakse lennundusele massiliselt ja nad on odavad. Mitmest lennuki turbokompressor-agregaadist komplekteeritakse gaasitur-

biinseadmed võimsusega 50 MW ja rohkem. Nende tööiga on piiratud. Lihtsa skeemiga tippkoormuse gaasiturbiin-elektrijaamad võivad olla kütuse väikese ülekulu juures suhteliselt odavad — 30—40 rbl/kW. Oluliseks nõudeks säärasele seadmetele on kiire käivitus (10—15 min.).

Vastavalt gaasiturbiinagregaatide võimsuse kasvule võivad nad tulla kasutusele ka suurtes elektrijaamades. Olemasolevate konstruktiivsete elementide kasutamisel võib luua gaasiturbiinagregaatide võimsusega 100—150 MW, kasuteguriga kuni 38%, mis võivad osutada konkurentsivõimelisteks sama võimsusega auruturbiinagregaatidega. Energeetika edasiseks arenguks on vaja agregaatide võimsusega 300—500 MW ja rohkem. Kas on võimalik luua sellise võimsusega gaasiturbiine?

Läbiviidud uurimised näitavad, et gaasi algtemperatuuril 750—800 °C ja rõhul 30—130 ata, kasutades õhu mitmekordset jahutust ja gaasi kuumutust ilma soojuse regeneratsioonita, võib luua gaasiturbiinagregaatide võimsusega 200—300 MW ja kasuteguriga kuni 40—42%. Turbiinide ja kompressorite kahevoollise kujunduse puhul võib agregaadid võimsuse viia kuni 400—500 MW. Selliste agregaatide loomiseks on vaja suure tootlikkusega ja kõrge kasuteguriga kompressoreid, mis töötaksid rõhuvahemikus 40—130 ata. Sääraseid kompressorite konstruktsioonid on praegusel ajal loomisel.

Tänapäeval praktikasse viidud konstruktiivsete elementide baasil võib luua ilma regeneratsioonita gaasiturbiinagregaatide võimsusega 300 MW ja kasuteguriga 36—38%. Võrreldes sama võimsusega auruturbiinagregaatidega annavad nad kokkuhoidu kapitalimahutustes 40—50%, omahinnas 10—40% ja jahutusvee kulus 5 korda.

Teiseks suunaks gaasiturbiinagregaatide võimsuse ja kasuteguri suurendamisel on gaaside algtemperatuuri tõstmine 1200—1300 °C-ni. Praegused kuumuskindlad terased sellisel kõrgel temperatuuril ei kõlba ja seetõttu tuleb gaasiturbiini kõrgetemperatuurilisi elemente hoolikalt jahutada õhu või vedelikkudega. Sellele kulub osa gaasi soojusest (2—3% energiast), ent sellegipärast suurendab algtemperatuuri tõstmine seadme üldist kasutegurit. Kõrgetemperatuurilised gaasiturbiinagregaadid võimsusega 300 MW ja rohkem võivad olla auruturbiinagregaatidest ökonoomsemad nii kapitalimahutuste kui ka kütuse erikulu suhtes.

Auruturbiinide kõrval hakkavad kaugemas tulevikus suurtes elektrijaamades töötama ka gaasiturbiinid võimsustega kuni 500—600 MW ja kasuteguriga kuni 45%. Selliseid turbiine võidakse kasutada nii masuudi kui ka loodusliku gaasi põletamisel. On käimas tööd gaasiturbiinseadmete loomiseks tahkele kütusele (kivisüsi, turvas). Katseseadmetel on kontrollitud põlemiskambri konstruktsiooni kivisöetolmu põletamiseks ja tuhapäädjaid, mis puhastavad gaasi enne gaasiturbiini minekut. Kestval töötamisel

põhjustavad tuhapüüdjast kinnipüüdmata jäänud peened tuhaosakesed gaasiturbiini labade tugevat kulumist (erosiooni). Kõrgetele soojuskoormustele arvestatud põlemiskambritesse sadestub šlakki. Senini ei ole veel õnnestunud ületada raskusi seoses kivisöetolmu andmisega kõrge rõhu all töötavasse põlemiskambris. Samuti on raskusi selliste seadmete automatiseerimisega.

Kivisöe põletamise teine variant seisneb kivisöe eelnevas gaasistamises kõrgrõhu-gaasigeneraatoris. Katseseadmetel on näidatud, et gaasigeneraatorist saadud gaasi põletamisel põlemiskambris on gaasiturbiin põhimõtteliselt töövõimeline. On äga raskusi gaasi puhastamisega tahketest osakestest ja gaasigeneraatorseadme automaatreguleerimisorganite vajaliku töökindluse tagamisega.

Käesoleval ajal on eksploatatsioonis mõned tahkel kütusel töötavad suletud skeemiga gaasiturbiiniseadmed, milles kivisütt või turvast põletatakse õhukuumutuskatla koldes. Katla torudesüsteemis kuumutatud õhk teeb turbiinis tööd ja pärast jahtumist temperatuurini 30—40 °C surutakse uuesti kompressoris kokku ning läheb kuumutamiseks tagasi katlasse. Selliste gaasiturbiiniseadmete sisseseade konstruktsioonid pole veel lõplikult välja töötatud.

Võib oodata, et kaugemas tulevikus juurutatakse praktikasse suure võimsusega gaasiturbiinid, mis töötavad tahkel kütusel avatud või suletud skeemiga.

III peatükk

HÜDROELEKTRIAAMADE SISSESEADE

1. HÜDROELEKTRIAAMAD

Jõgede energiat kasutati juba ammu vesiveskite käitamiseks Hiinas, Indias, Babüloonias ja Egiptuses. Venemaa vesiveskitest leidub viiteid dokumentides XI sajandist. Kasutati nii horisontaalse kui ka vertikaalse völliga vesiratast. Neid kasutati mitmesuguste masinate käitamiseks: vilja-, maagi-, püssirohuveskid, klaasi- ja paberivaltsid, metallilöikepingid, haamid, saeveskid ja kudumismasinad.

Vesiratas oli piiratud võimsuse (5 kuni 300 hj) ja madala kasuteguriga. Isegi kaasaegsete ülemise juurdevooluga puust vesirataste kasutegur on vaid 60—65%.

Aastal 1750 leiutas ungari teadlane Segner vesiratta, mis pöörles tema äärisest väljuvate veejugade reaktsiooni mõjul. See vesiratas on reaktiivturbiini eelkäijaks. Euler tõestas teoreetiliselt, et Segneri ratta kasutegur ei saa ületada 50% ja et reaktiivturbiini kasuteguri tõstmiseks on vajalik suunav seade, mis võimaldaks veejoal siseneda tööratasse löögivabalt. Euler esitas sellise kõverate labadega vesiturbiini skeemi. Esimene seda tüüpi turbiin ehitati Prantsuse inseneri Furneironi poolt 1834. a. Sõltumatult temast ehitas Uraali tammimeister I. E. Sofonov aastatel 1835—1841 esimesed Venemaa hüdroturbiinid võimsusega 36—60 hj ja kasuteguriga kuni 70%. Hüdroturbiinide töörataste läbimõõt oli märgatavalt suurema võimsuse juures väiksem kui vesiratastel. Aastaks 1863 töötas üksnes Venemaa metallurgiatehastes 58 hüdroturbiini.

Seoses vahelduvvoolumootorite ilmumisega ja elektriliinide arenguga XX saj. algul tekkis vajadus kaasaegsemate ja võimsamate turbiinide loomiseks elektrijaamadele. Aastaks 1917 töötasid Venemaal kolm elektrijaama üldvõimsusega 4900 kW. Suurte hüdroelektrijaamade ehitamine algas vastavalt GOELRO plaanile. Aastaks 1935 oli ehitatud 19 tolle aja kohta suurt hüdroelektrijaama üldvõimsusega 750 MW ja 1941. a. töötas NSV Liidus juba 39 hüdroelektrijaama üldvõimsusega 1,5 milj. kW.

Sõja ajal vähenes hüdroelektrijaamade võimsus kolmekordselt, sealjuures hävisid viis suurt jaama üldvõimsusega 780 MW.

Aastaks 1950 taastati purustatud jaamad ja ehitati rida uusi, kusjuures nende üldvõimsus oli 3,2 milj. kW. Edasi algas suurimate hüdroelektrijaamade eksploatatsiooni andmine Volgal, Kaamal, Dnepril ja Angaral. Praegusel ajal annavad hüdrojaamad umbes 20% maa üldisest elektrienergia toodangust.

NSV Liidu potentsiaalsed hüdroenergeetilised ressursid on 3300 miljardit kWh (1477 jões, mis on kõlblikud hüdroelektrijaamade ehituseks). Sellised jõed, nagu Jenissei, Leena, Angara, Ob, Amuur, Kolõma, Sõr-Darja, Amu-Darja, Volga, Kaama ja Dnepr omavad hüdroressursse umbes 2000 miljardi kWh piirides.

Esimene GOELRO plaanis ettenähtud hüdroelektrijaam võimsusega 56 MW ehitati Volhovis 1926. a. Aastal 1932 saavutas täisvõimsuse sel ajal Euroopa kõige võimsam hüdroelektrijaam Dnepril — 650 MW. Aastal 1958 anti Zigulis eksploatatsiooni maailma suurim V. I. Lenini nimeline Volga hüdroelektrijaam võimsusega 2,3 milj. kW. Enne seda oli maailma suurimaks Grand-Coulee' hüdroelektrijaam võimsusega 1,95 milj. kW. Aastal 1960 anti eksploatatsiooni teine hiiglaslik NLKP XX Kongressi nimeline Volga hüdroelektrijaam võimsusega 2,53 milj. kW. Aastal 1964 saavutas projekteeritud võimsuse 3,6 milj. kW Bratski hüdroelektrijaam Angaral. Veelgi võimsam on Jenisseil ehitatav Krasnojarski hüdroelektrijaam võimsusega 5 milj. kW. Järgmise, Jenisseil rajatava Sajano-Sušenski hüdroelektrijaama võimsus on 6 milj. kW.

Hüdroturbiinide tootmine NSVL-s algas Leningradi Masinatehases 1924. a., mil lasti välja kaks agregaatit võimsustega 55 ja 37 kW. Aastal 1927 toodeti juba turbiine võimsusega 3700 kW, aastatel 1930—1933 — kuni 15 000 kW. Aastaks 1941 toodeti 150 hüdroturbiini üldvõimsusega 900 000 kW, millede hulgas olid tolle aja kohta maailma suurimad, Volga jaamadele ehitatud pööratavate labadega hüdroturbiinid võimsusega 70 MW.

Pärast Suurt Isamaasõda ehitati Dnepri hüdroelektrijaamale aksiaal-radiaalturbiinid võimsusega 75 MW. Maailma võimsaimad pööratavate labadega hüdroturbiinid võimsusega 126 MW on loodud Leningradi Masinatehases uutele Volga hüdroelektrijaamadele (V. I. Lenini nim. ja NLKP XXII Kongressi nim.). Sama tehas valmistas ka maailma suurimad aksiaal-radiaalturbiinid võimsusega 225 MW Bratski hüdroelektrijaamale. Veel võimsamaid seda tüüpi turbiine võimsusega 508 MW ehitatakse tehases Krasnojarski hüdrojaamale.

Hüdroturbiinid kasutavad energiat, mis saadakse vee voolamisel kõrgemalt nivoolt (enne hüdrojaama tammi) madalamale nivoole (pärast tammi). Nende nivoode vahet nimetatakse rõhukõrguseks H_n ja läbi turbiini minevat vee hulka — kuluks Q . Vee voolu võimsus

$$N_n = 9,81QH_n \text{ kW.}$$

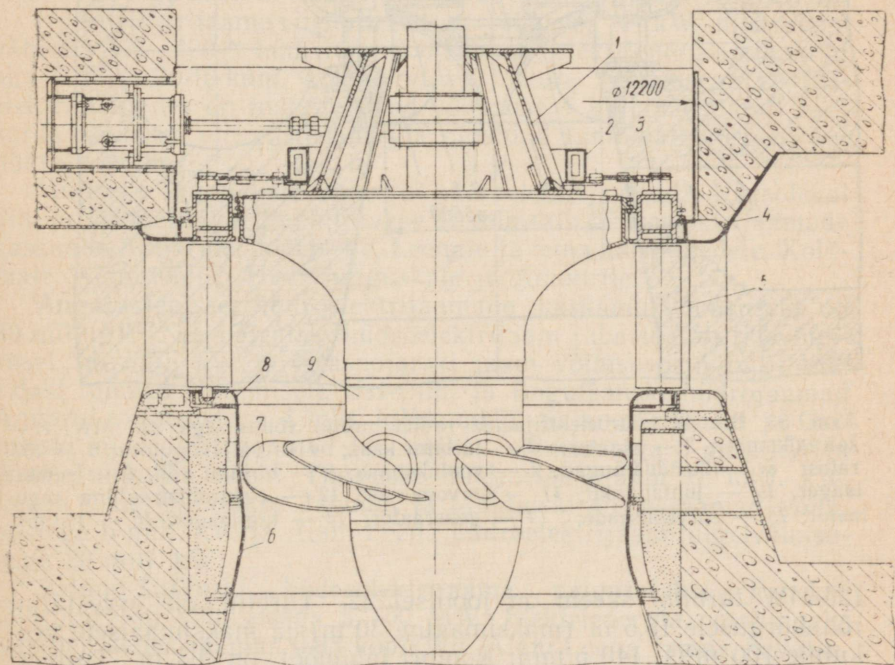
Turbiinis kasutatakse ära voolamistrakti takistuste tõttu suuruselt H_n väiksem rõhukõrgus H . Energiakadude tõttu turbiinis ja generaatoris on võimsus generaatori klemmidel N väiksem võimsusest N_n :

$$N = N_n \eta_m \eta_g = 9,81 Q H \eta_m \eta_g.$$

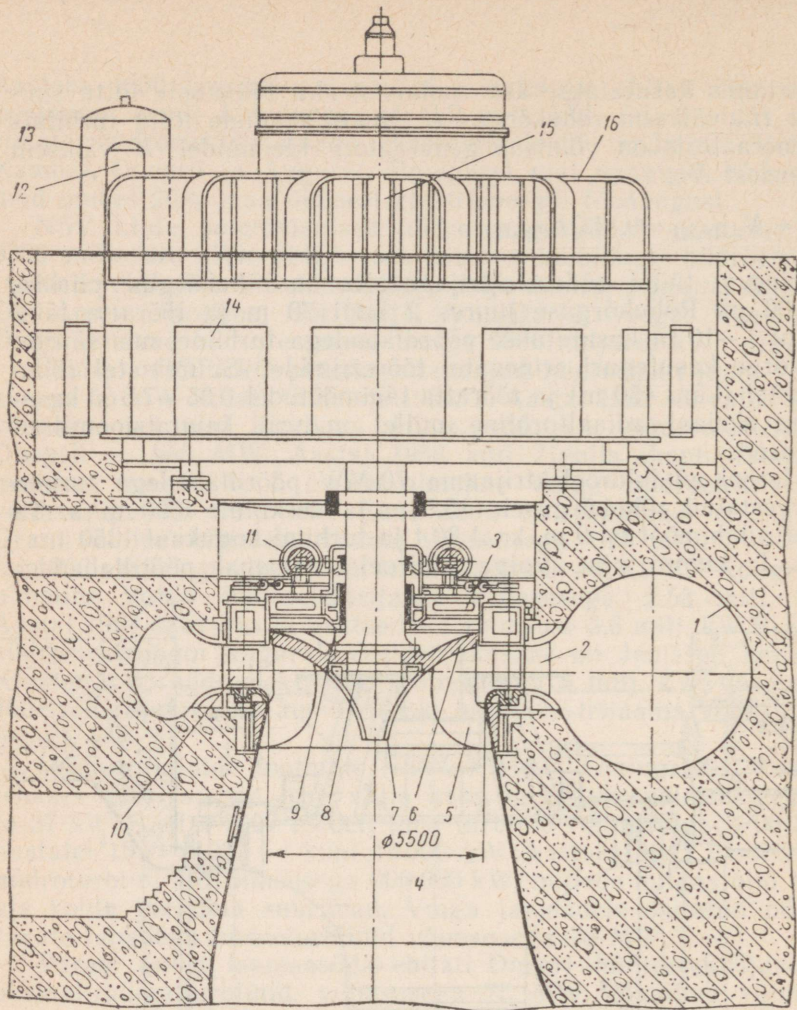
Erinevat tüüpi hüdroelektrijaamades on rõhukõrgus piirides 2—2000 m. Rõhukõrguse juures 2 kuni 70 m ja töörratta läbimõõdul 1—10 m kasutatakse pöördlabadega turbiine, mis säilitavad kõrge kasuteguri erinevatel töörežiimidel. Suurematel rõhukõrgustel (kuni 450 m) ja töörratta läbimõõdul 0,35—7,5 m kasutatakse aksiaal-radiaalturbiine, millel on head kavitatsioonilised omadused.

Stšerbakovi hüdroelektrijaama 70-MW pöördlabadega turbiin on arvestatud rõhukõrgusele 15,5 m ja veekulule 500 m³/s. Ta töörratta läbimõõt on 9 m, kaal 30 t ja turbiini kogukaal 1350 t.

V. I. Lenini nim. Volga hüdroelektrijaama pöördlabadega



Joon. 32. Volga hüdroelektrijaama pöördlabadega hüdroturbiin võimsusega 126 MW: 1 — tugi; 2 — reguleerimisrõngas; 3 — ülemine rõngas; 4 — staator; 5 — juhtaparaadi laba; 6 — rootorikamber; 7 — laba; 8 — alumine rõngas; 9 — rootor.



Joon. 33. Bratski hüdroelektrijaama radiaalturbiin võimsusega 230 MW: 1 — spiraalkamber; 2 — staator; 3 — turbiini kaas; 4 — väljaviigutoru; 5 — töö-
 ratas; 6 — tihendusrõngad; 7 — voolukoonus; 8 — turbiini völli; 9 — suunav
 laager; 10 — juhtaparaat; 11 — servomootor; 12 — elektrohüdrauliline regu-
 laator; 13 — surveõliseade; 14 — generaator; 15 — tugilaager; 16 — ristmik.

126-MW turbiini skeem on joonisel 32. Turbiin on arvestatud rõhukõrgusele 19,5 m (maksimaalne 30 m) ja maksimaalsele vee-
 kulule 700 m³/s, 140 p/min. Rootori läbimõõt on 9,3 m. Turbiini
 garanteeritud kasutegur on 93,5%. Jaamas töötab 20 sellist agre-
 gaati.

Leningradi Masinatehases Dneprogessile ehitatava 75-MW
 aksiaal-radiaalturbiini rootori läbimõõt on 5,45 m ja mass 90 t.

Kogu turbiini mass on 500 t ja kasutegur 93,7%. Selle hüdrojaama esimesed kolm turbiini on toodetud firmas «Newport-News» (USA) ja nende kasutegur on 92,5%.

Leningradi Masinatehases Bratski hüdroelektrijaamale ehitatud aksiaal-radiaalturbiin võimsusega 225 MW (maksimaalne 230 MW) on arvestatud rõhukõrgusele 96 m (maksimaalne 106 m) ja veekulule 257 m³/s (joon. 33). Tema rootori läbimõõt on 5,5 m ja kasutegur 93%. Jaamas on 16 sellist agregaatit.

Krasnojarski hüdrojaamale on projekteeritud aksiaal-radiaalturbiin maksimaalse võimsusega 508 MW, veekuluga 500 m³/s ja rõhukõrguse diapsooniga 76—100 m. Rootori läbimõõt on 7,5 m. Turbiini mass on 1300 t ja pöörlemiskiirus 93,8 p/min. Arvutuslik kasutegur on 94%. Hüdrojaama on ette nähtud 10 säärast agregaatit ja peale selle kaks reserv-(katse-) agregaatit.

Sõjajärgsetel aastatel suurenes võimsate hüdroturbiinide kasutegur 92-lt% kuni 93,5—94%. Pöördlabadega turbiinide mass vähenes 29-lt kuni 15 kg/kW, keskmise rõhukõrgusega aksiaal-radiaalturbiinide mass vähenes 20-lt kuni 7,5 kg/kW-ni ja suure rõhukõrgusega aksiaal-radiaalturbiinide mass 9-lt kuni 4 kg/kW-ni.

Hüdroelektrijaama installeeritud võimsuse 1 kW maksumus vähenes 300—400-lt kuni 160—200 rublani, elektrienergia omahind aga 0,25—0,30-lt kuni 0,09 kop/kWh. Suure võimsusega soojus- ja elektriijaamades on installeeritud võimsuse 1 kW maksumus 2—3 korda väiksem, ent elektrienergia omahind tunduvalt kõrgem kui hüdrojaamades.

Milliseks kujunevad tuleviku hüdroelektrijaamad? Käesoleval ajal projekteeritakse ja ehitatakse ülivõimsate hüdroelektrijaamade kaskaade Angarale, Jenisseile, Leenale ja tema harujõgedele, Kolõmale, Alam-Obile, Alam-Tunguskale ja Amuurile.

Angara-Jenissei hüdroelektrijaamade kaskaadi võimsuseks on 30 milj. kW. Neist Bratski hüdroelektrijaam juba töötab täisvõimsusel 3,6 milj. kW ja Krasnojarski jaam võimsusel 5 milj. kW. Edasi tulevad ehitamisele Ust-Ilimi ja Bogutšanski hüdrojaamad Angaral võimsustega 4 milj. kW kumbki, Sajano-Šušenski ja Osinovski hüdroelektrijaamad Jenisseil — võimsustega 6 milj. kW ja Alam-Tunguska jõe ja Tunguska hüdroelektrijaam 6 milj. kW. Leena jõe ehitatakse Jakuudi ja Muktuiski elektriijaamad võimsustega 5 milj. kW ja Alam-Leena hüdroelektrijaam hiigelvõimsusega 20 milj. kW.

Sajano-Šušenski hüdroelektrijaama paigutatakse kaheksa hüdroturbiini võimsusega à 700 MW. Elektrienergia omahinnaks kujuneb selles jaamas 0,03 kop/kWh. Alam-Leena jaama kavatakse paigutada 20 agregaatit võimsusega à 1000 MW. Selle hüdrojaama võimsus ületab 10-kordselt kõige suurema välismaise hüdrojaama võimsuse.

Ülivõimsates hüdroelektrijaamades on ette nähtud täielik automatiseerimine ja nad võivad töötada eksploatatsioonipersonalita.

2. TÕUSU-MÕONA ELEKTRIJAAAMAD

Tõusu-mõõna ehk loodete nähtused tekivad ookeanidel ja avatud meredel Kuu ja Päikese külgetõmbejõu tulemusel, kusjuures Päikese mõju tõusule-mõõnale on 2,6 korda väiksem Kuu mõjust. Kõige suurem tõusu-mõõna amplituud esineb siis, kui Päike, Kuu ja Maa asuvad ühel sirgel, kõige väiksem efekt esineb aga siis, kui nad asuvad täisnurga all. Ööpäeva vältel (Maa ööpäevasel pöörlemisel ümber oma telje) vahelduvad kaks tõusu ja mõõna.

Tõus on erinevates geograafilistes punktides erinev. Maksimalised amplituudid on mõõdetud Ameerika kallastel (Uus-Sotimaal) 21 m, Magalhãesi väinas — 18 m. Prantsusmaa kallastel Saint-Malo juures ja Inglismaal (Severni jõesus) küünib amplituud 15 meetrini, Koreas ja Austraalias — 11 m. NSVL-s esineb suurim tõus Ohhoota meres — 11 m ja Valges meres 8—10 m.

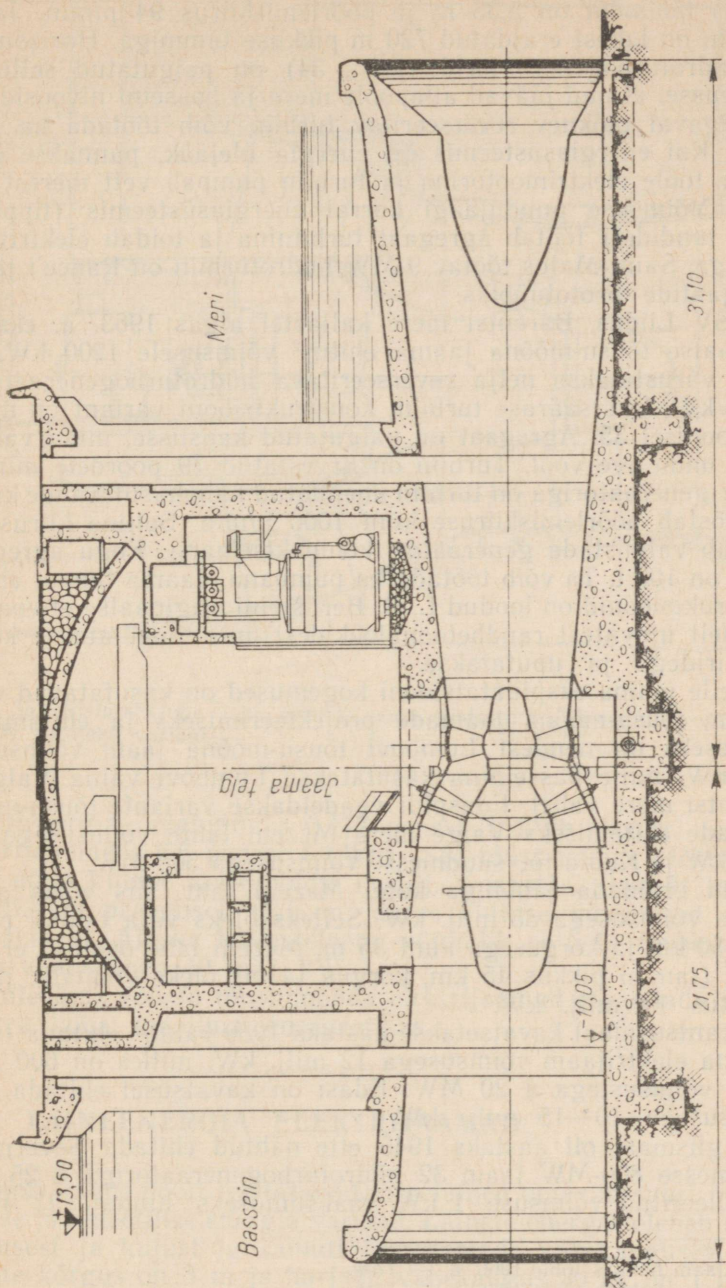
Tõusulaine üldvõimsuseks hinnatakse 40 miljardit kW, mis ületab 10-kordselt kõikide maailma jõgede hüdroressursid. Loetakse, et tõusuenergia kasutamine on majanduslikult otstarbekohane ja tehniliselt võimalik ranniku kohtades, kus tõusu amplituud on vähemalt 3—4 m.

Umbes 1000 aastat tagasi ehitati Prantsusmaa, Inglismaa ja Hispaania rannikul tõusu-mõõna energiaga töötavaid veskeid. Veel aastal 1941 töötas Inglismaal 10 sellist veskit võimsusega à 30—50 kW. XVIII sajandil ekspluateeriti tõusu-mõõna veskeid ka Venemaal. Mõned tõusu-mõõna veskid töötavad kuni käesoleva ajani USA-s.

Tõusu-mõõna veskid ehitatakse väikeste lahtede juurde ookeanide või merede rannikul. Tõusu ajal avanevad vesiväravad ja vesi täidab basseini. Mõõna alguseks vesiväravad suletakse ja vesi voolab basseinist tagasi merre läbi vesiratta. Vesiväravad avanevad ja sulguvad automaatselt tõusu- või mõõnalaine toimel. Hiinas, Saksamaal ja Kanadas kasutati tõusu-mõõna veskeid vee pumpamisel põldude niisutamiseks, saekaatrite käivitamiseks jne.

Aastal 1913 ehitati Saksa merele väike tõusu-mõõna elektrijaam (loodete-elektrijaam). Hiljem ehitati sarnane seade võimsusega 2500 hj Prantsusmaale. Aastal 1928 algas Prantsusmaal 5000-kW tõusu-mõõna elektrijaama ehitus, ent tehnilistel ja finantsilistel põhjustel jäi see lõpetamata. USA-s alustati aastal 1935 Kwoddy tõusu-mõõna elektrijaama ehitamist võimsusele 200 MW, kuid see jäi samuti lõpetamata. Aastal 1940 töötati välja NSV Liidus L. B. Bernšteini kavandi järgi Kislogubski eksperimentaalse tõusu-mõõna elektrijaama projekt võimsusele 2000 kW. Hiinas töötab alates 1958. aastast mõnikümmend väikese võimsusega tõusu-mõõna elektrijaama. Prantsusmaal töötab jaam, mille turbiini võimsus on 9000 kW.

Aastal 1961 alustati Prantsusmaal, Rance'i jõe suudmes, Saint-Malo lahes tõusu-mõõna elektrijaama ehitamist¹ võimsusele



Joon. 34. Rance'i loodetejaama hoone.

240 MW, mis varustatakse 24 hüdroturbiiniga à 10 MW. Turbiini rootori läbimõõt on 5,35 m ja pöörlemiskiirus 94 p/min. Jaama bassein on lahest eraldatud 720 m pikkuse tammiga. Horisontaalsed hüdroturbogeneraatorid (joon. 34) on paigutatud sellisesse sügavusse, et nad jäävad allapoole mere ja basseini nivoosid.

Sügaval paiknev reverseeritav turbiin võib töötada ka pumbana. Kui energiasüsteemis on energia ülejääk, pannakse generaator tööle elektrimootorina ja turbiin pumpab vett merest basseini. Võimsuse puudujäägi korral energiasüsteemis (tippkoormuse tundidel) töötab agregaat turbiinina ja toidab elektrivõrku vooluga. Saint-Malos töötav 9-MW hüdroturbiin on Rance'i jaama agregaatide prototüübiks.

NSV Liidus, Barentsi mere kallastel algas 1963. a. eksperimentaalse tõusu-mõõna jaama ehitus² võimsusele 1200 kW. See jaam varustatakse nelja reverseeritava hüdroturbogeneraatoriga à 400 kW. Üks säärase turbiini konstruktsiooni variant on näidatud joonisel 35. Agregaat on paigutatud kapslisse, mida väljastpoolt uhub vee vool. Turbiin on arvestatud 79 pöördele minutis. Elektrigeneraatoriga on turbiin ühendatud hammasülekande kaudu, mis tõstab pöörlemiskiiruse kuni 1000 p/min. Selline kiirus võimaldab valmistada generaatori kompaksemana. Kogu agregaadi mass on 100 t. Ta võib töötada ka pumbana. Jaama tammi ehituskonstruktsioonid on loodud L. B. Bernšteini originaalse ettepaneku kohaselt ujuvatest raudbetoonblokkidest, mis toimetatakse kohale puksiiridega ja uputatakse.

Selle jaama ekspluatatsiooni kogemused on kasutatavad võimsamate tõusu-mõõna jaamade projekteerimiseks ja ehitamiseks. Esimeseks on nendest Lumbovi tõusu-mõõna jaam võimsusega 350 mW, mille basseinina kasutatakse Lumbovi väina Valge ja Barentsi mere vahel. Edaspidi vaadeldakse variante tõusu-mõõna jaamade ehitamiseks Valge mere Mezeni lahte võimsusega 1,35 milj. kW ja Kuula jõe suudmesse võimsusega 500 MW.

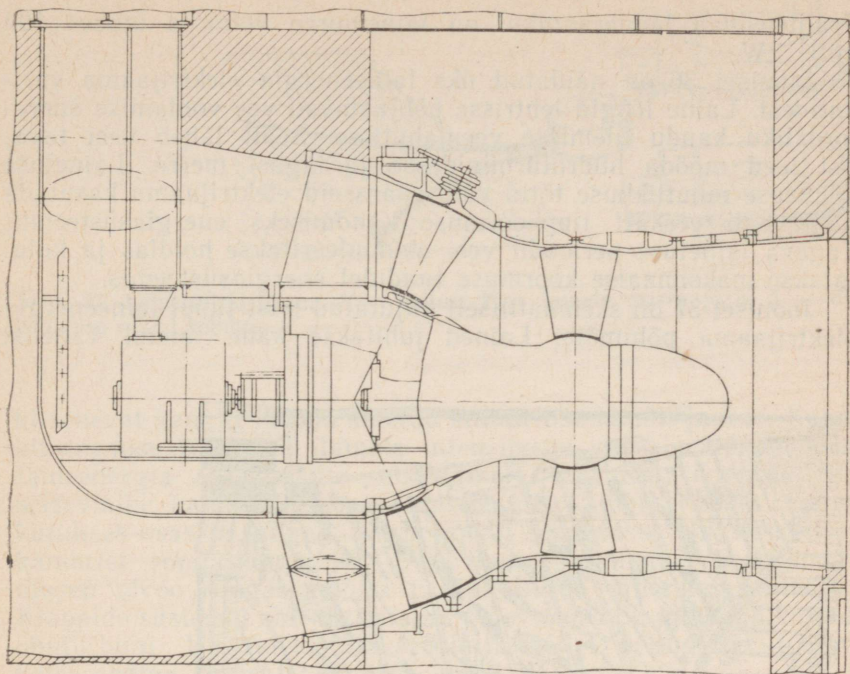
Kui eraldada tammiga kogu Mezeni laht, siis võiks saada jaama võimsusega 35 milj. kW. Selleks oleks vaja tammi pikkusega 50 km ja kõrgusega kuni 35 m. Mezeni lahe osalisel eraldamisel (tammi pikkus 45 km, kõrgus 14 m) oleks võimalik jaama võimsus 14 milj. kW.

Prantsusmaal kavatakse aastaks 1980 valmis ehitada tõusu-mõõna elektrijaam võimsusega 12 milj. kW, milles on 600 agregaat võimsustega à 20 MW. Edasi on kavatsusel ehitada jaam võimsusega 10—15 milj. kW.

Inglismaal oli aastaks 1945 ette nähtud ehitada Severni jõe suudmesse 800-MW jaam 32 hüdroturbogeneraatoriga à 25 MW. Installeeritud võimsuse 1 kW maksumuseks hinnati 33 naela,

¹ Jaam hakkas tööle 1966. a. — *Tõlk.*

² Jaam hakkas tööle 1968. a. — *Tõlk.*



Joon. 35. Kislaja Guba lahe loodetejaama hüdro-turbogeneraator võimsusega 400 kW (projekti variant).

elektrienergia omahinnaks 0,177 pentsi 1 kWh kohta (soojus-elektrijaamades 0,6 pentsi 1 kWh). See tõusu-mõõna elektrijaam võib anda kütuse kokkuhoidu 1 milj. t. aastas. Projekt konserveeriti, ent praegusel ajal on jaama ehituse küsimused uuesti päevakorral. Alaska kallastele on võimalik ehitada tõusu-mõõna jaam võimsusega 40 milj. kW.

Tulevikus võivad tõusu-mõõna elektrijaamad omandada silmapaistva koha maailma energeetikas.

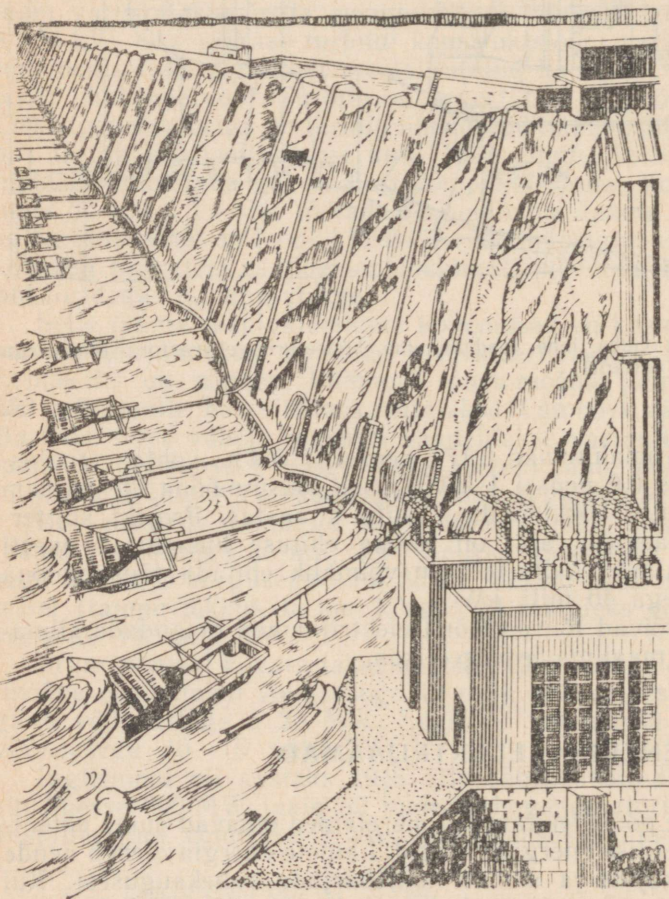
3. LAINEENERGIA ELEKTRIJAMAD

Ohuvoolude poolt tekitatavad merelained omavad suuri potentsiaalse ja kineetilise energia varusid. Lainete energia oleneb nende kõrgusest ja kujust ja samuti laineharjade vahekaugusest. Kui lainete kõrgus on 3 m ja harjade vahekaugus 30 m, on 1 meetri pikkuse lainefrondi võimsus 66 kW. On välja arvatud, et üksnes

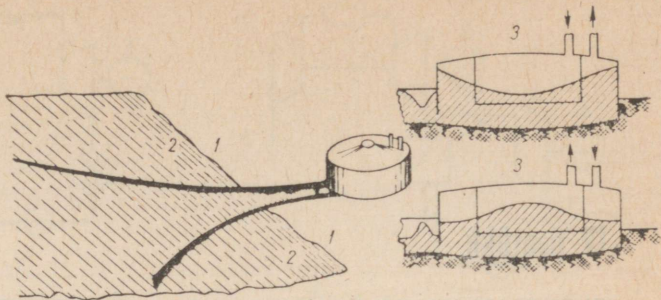
Prantsusmaa läänerannikul on lainemurru võimsus umbes 100 milj. kW.

Joonisel 36 on näidatud üks laineenergia elektriijaama variantidest. Laine löögid lehtrisse põhjustavad vee voolamise surve-
torustiku kaudu ülemisse veemahutisse. Sealt läheb vesi tavalist teed mööda hüdroturbiinidesse ja tagasi merre. Lainetuse võimsuse muutlikkuse tõttu võib sääraseid elektriijaamu kasutada nähtavasti eeskätt tippkoormuse kandmiseks energiasüsteemis. Tugeva lainetuse perioodil vesi akumuleeritakse hoidlas ja kulutatakse maksimaalse koormuse tundidel energiasüsteemis.

Joonisel 37 on skemaatilisel kujutatud teist tüüpi laineenergia elektriijaama põhimõte. Lained juhitakse kahe tammi vahelist



Joon. 36. Laineenergiaal töötav hüdroelektriijaam.



Joon. 37. Lainetelektrijaam: 1 — kallas; 2 — lainete murru joon; 3 — õhu liikumise suund kambriis.

kitsenevat kanalit mööda suletud silindrilise kanali juurde. Kanali kitsenemise tulemusel lainete intensiivsus kasvab. Võimendatud laineenergia antakse üle seisevlainele, mis tekib kambriis. Kui seisevlaine kambri keskosas tõuseb, siis kambri välises, rõngakujulises osas ta langeb. Sel perioodil tõugatakse õhk keskmisest kambriist rõngaskambriisse. Seisevlaine laskumisel keskkambriis tõuseb nivoo rõngaskambriis ja õhk liigub jälle keskkambriisse. Klappide süsteemi abil tekitatakse pidev õhuvool, mis võib kasutada õhuturbiini. USA-s töötatakse välja sellel põhimõttel töötava katseadme projekti võimsusele 50 MW.

Huvitava seadme skeemi merelainete energia kasutamiseks soovitas insener V. S. Sidorenko. Mootoriks on selles seadmes nn. laineturbiin. Laine lööke vastuvõtvas erikujulises torus liigub suletud rõbasteel vankrike, mille teljele on paigutatud alalisvoolugeneraator, mis annab võrku voolu.

Praeguseni ei ole veel töötavaid laineenergia elektrijaamu ja puuduvad andmed nende tehnilis-ökonomiliste näitajate hindamiseks. On aga väljaspool kahtlust, et energiaressursside mittepisavuse tõttu võetakse tulevikus kasutusele ka merelainete energia.

ELEKTRIJAAMADE KOMBINEERITUD PROTSESSIGA SEADMED

1. AURU-GAASIJÕUSEADMED

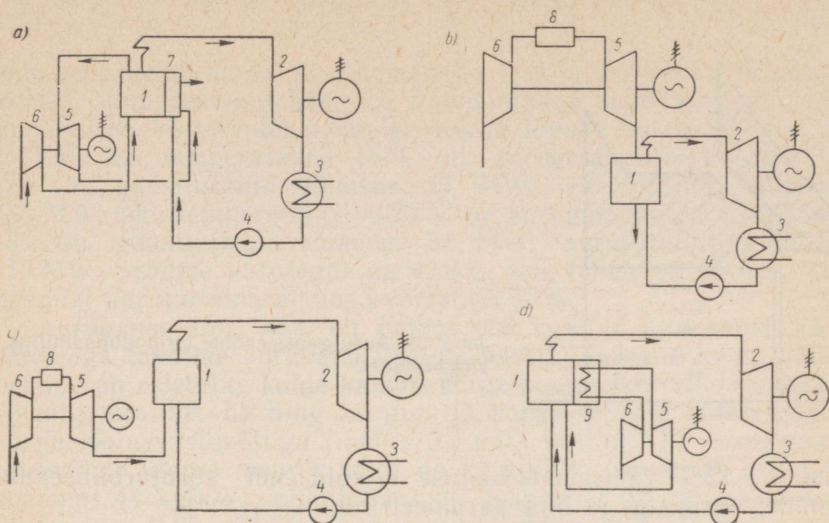
Auru- ja gaasiturbiinidega termodünaamiliste ringprotsesside eeliseid ja puudusi vaatlesime 1. ja 2. peatükis. Elektriijaamade tehnilis-ökonomiliste näitajate parandamine on võimalik auru ja gaasiringprotsesside kombineerimisel. Selliseid kombineeritud seadmeid nimetatakse auru-gaasijõuseadmeteks.

Kombineeritud auru-gaasijõuseadmete võimalikkude variantide soojusskeemid on näidatud joonisel 38.

Skeemil 38, *a* annab kompressor õhu rõhul 4–6 ata aurugeneraatori koldesse. Kütuse põlemine kõrgel rõhul võimaldab tõsta kolde soojuslikku erikoormust ja samuti ka gaaside kiirust katla suitsukäikudes, millega tunduvalt intensiivistub soojusülekanne. Selle tulemusel osutuvad sellise katla gabariidid ja metalli mass 2–3 korda väiksemaks, võrreldes tavaliste kateldegaga. Katlast väljuvad suitsugaasid suunatakse gaasiturbiini ja seejärel läbi vee ökonomaiseri korstnasse. Aurugeneraatorist saadav aur teeb tööd auruturbiinis ja suitsugaasid gaasiturbiinis. Selline seade võib töötada vedelkütusel (masuut) ja looduslikul gaasil.

Teine seade (joon. 38, *b*) erineb esimesest selle poolest, et kütuse põletamine toimub gaasiturbiini põlemiskambris ning gaasiturbiinist väljuvad põlemissaadused saavad utilisatsioonkatlasse, millest saadavat auru kasutatakse auruturbiinis. Auru algparameetrid ei saa sellise seadme skeemi puhul olla kõrged. Turbiinist lahkuvate gaaside temperatuuri tõstmine võimaldaks küll auru temperatuuri tõsta, kuid siis peaks turbiini võimsus olema väiksem. Kütusena võib selles seadmes kasutada ainult vedelkütust ja gaasi.

Kolmandal skeemil (joon. 38, *c*) näidatud seadmes võib gaasiturbiin töötada masuudil või looduslikul gaasil. Põlemissaadused suunatakse veel küllaldase hapnikusisalduse juures tavalise katla koldesse, kus põletatakse mistahes kütust (kivisüsi, masuut, gaas). Neljas auru-gaasi jõuseadme tüüp (joon. 38, *d*) on samuti kõlblik ükskõik millise kütuse põletamiseks. Tavalise katla gaasikäiku on paigutatud torukimbud, milles kompressoriga antav õhk soojeneb



Joon. 38. Auru-gaasiseadmete soojusskeemid; *a* — ülerrõhukoldega aurugeneraatoriga; *b* — utilisatsioonkatlaga; *c* — gaaside väljalasuga katlasse; *d* — õhuturbiiniga (*1* — aurukatel; *2* — auruturbiin; *3* — kondensaator; *4* — pump; *5* — gaasiturbiin; *6* — kompressor; *7* — toitevee ökonomaiser; *8* — põlemiskamber; *9* — õhuelsoojendi).

kuni temperatuurini umbes 600 °C. Seejärel teeb õhk tööd gaasiturbiinis ja antakse siis katla koldesse kütuse põletamiseks.

Auru-gaasi jõuseadmes on gaasiringprotsess ülestatud auru ringprotsessile (joon. 39). Viirutatud pindala Q_g kujutab gaasiturbiini ringprotsessi kasulikku tööd. Joonele 4—1 vastab soojuse juurdejuhtimine, joonele 1—2 gaasi paisumine turbiinis, joonele 2—3 soojuse väljajuhtimine gaasi ringprotsessist ja üleandmine ökonomaiseris kuumutatud veele, kuhu turbiinist väljuvad gaasid suunatakse. Joonele 3—3' vastab soojuse väljajuhtimine gaasi ringprotsessist. Joone 3—3' all olev pindala Q_{hg} väljendab soojuskadu heitgaasidega. Pindala Q_a kujutab aururingprotsessi kasulikku tööd, pindala Q_h soojuskadusid kondensaatori jahutusveega.

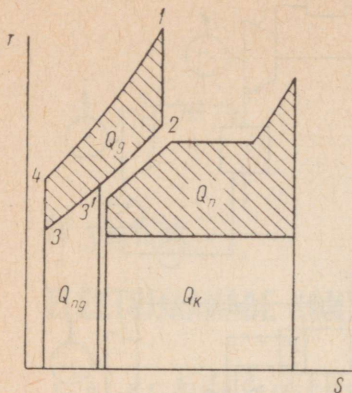
Kombineeritud auru-gaasi ringprotsessi kasutegur

$$\eta_t = \frac{Q_g + Q_a}{Q_g + Q_a + Q_{hg} + Q_h}.$$

Ta on kõrgem auru ringprotsessi kasutegurist samadel auru parameetritel, sest gaasi ringprotsessi ülestamine tõstab juurdejuhitava soojuse keskmist temperatuuri.

Veeökonomaiser täidab auru-gaasi jõuseadmes gaasiturbiini suhtes regeneraatori funktsioone, vähendades soojuskadusid heitgaasidega. Et soojust kantakse üle õhu asemel veele, võib regeneratsiooniasete osutada suhteliselt kõrgeks.

Auru-gaasi jõuseade komprimeeritud õhu aurugeneraatoriga



Joon. 39. Auru-gaasiseadme termodünaamiline ringprotsess.

omab 8—12% väiksemat soojuste erikulu kui auruturbiiniseade samadel auru alg- ja lõpp-parameetritel.

Kombineeritud auru-gaasi ringprotsessi teooria on välja töötatud NSV Liidus. Käesoleval ajal töötab kaks auru-gaasi jõuseadet komprimeeritud õhu aurugeneraatoritega 50 ja 120 t/h.

Seadmes aurugeneraatoriga 120 t/h esimeses Leningradi Riiklikus Elektriijaamas on auru algparameetrid 100 ata, 540 °C, võimsus vastavalt kondensatsioonrežiimile 40 MW. Aur kasutatakse ära auruturbiinis vasturõhuga 18 ata ja võimsusega 12 MW. Gaasiturbiin altemperatuuriga 700 °C ja rõhuga 4,94 ata arendab võimsust 4,57 MW. Kütuse erikulu on 0,366 kg/kWh, millele vastab seadme netokasutegur 33,7%. Elektrienergia omahind on 0,65 kop/kWh.

Projekteerimisel on auru-gaasi jõuseadmed võimsusega 200 ja 400 MW auruturbiinidele 160 MW, 130 ata, 565 °C ja 300 MW, 240 ata, 560/565 °C.

Joonisel 40 on antud auru-gaasi seadme skeem 200-MW auruturbiiniga ja 35-MW gaasiturbiiniga. Atmosfääri õhk surutakse kokku madalrõhukompressoris, jahutatakse vahejahutis, surutakse kokku kõrgrõhukompressoris ja läheb siis aurugeneraatori põletitesse. Kütuse põlemissaadused suunatakse kompressorit ja generaatorit kaitvasse gaasiturbiini rõhul 6 ata ja temperatuuril 700 °C. Pärast gaasiturbiini läbivad gaasid ökonomaiseris ja lähevad korstnasse.

Aurugeneraatori aurustusküttepinna moodustub auru ja vee segu, mis läheb separaatorisse. Selles eraldub aur läheb ülekuumendisse, vesi aga antakse tsirkulatsioonipumbaga uuesti aurugeneraatorisse. Auru ülekuumendist väljuv aur rõhul 140 ata ja temperatuuril 570 °C suunatakse auruturbiini kõrgrõhuosasse, kuumutatakse seejärel aurugeneraatori gaasikäigust uuesti temperatuurini 570 °C ja läheb turbiini keskrõhuossa, seejärel aga madalrõhuossa.

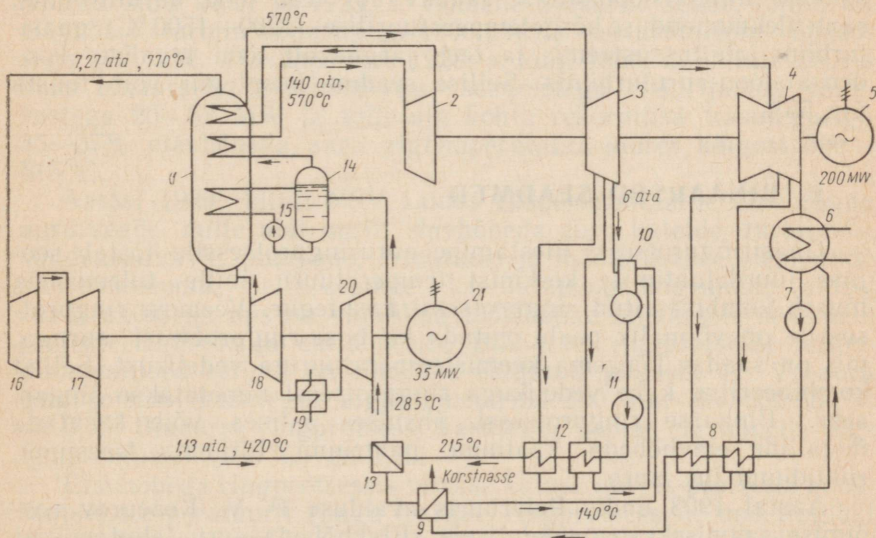
Kondensaati antakse kondensaadipumbaga läbi kahe madal-

rõhu-eelsoojendi madalrõhuökonomaiserisse ja sealt edasi deaeraatorisse. Viimasest antakse vesi toitepumbaga kahte kõrgrõhu-eelsoojendisse, kõrgrõhuökonomaiserisse ja lõpuks separaatorisse.

Välisõhu temperatuuril 15°C on aurugeneraatori tootlikkus 420 t/h, gaasiturbiini võimsus 27 MW, auruturbiini võimsus 185 MW. Õhu temperatuuril -25°C on aurugeneraatori tootlikkus 480 t/h, gaasiturbiini võimsus 33 MW, auruturbiini võimsus 210 MW. Seadme kasutegur on 42,3%, mis tähendab kütuse ökonoomiat auruturbiinseadmega võrreldes 12%.

Aurugeneraatori kaal on umbes 600 t, kuna aga sama tootlikkusega tavaline aurukatel kaalub 3000 t. Säärane kaalu vähenemine on seletatav kolde kambri kõrge soojusliku erikoormusega (6 milj. kcal/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}$) ning kiirgus- ja konvektiivsete küttepindade kõrge soojusvastuvõtuga (umbes $0,5$ milj. kcal/ $\text{m}^2 \cdot \text{h}$). Auru-gaasi jõuseadme üldine metalli mass on 22 kg/kW (tavalises aurujõuseadmes 44 kg/kW), erikubatuur on peahoonel $0,4$ m^3/kW (aurujõuseadmes $0,85$ m^3/kW). Installeeritud võimsuse 1 kW maksumus on auru-gaasi jõuseadmel 30 rbl., seevastu aga aurujõuseadmel 60 rbl.

Esialsed arvutused näitavad, et on võimalik luua 600—



Joon. 40. 200-MW auru-gaasiseadme soojusskeem: 1 — aurugeneraator; 2 — auruturbiini kõrgrõhuosa; 3 — keskrõhuosa; 4 — madalrõhuosa; 5 — generaator; 6 — kondensaator; 7 — kondensaadipump; 8 — madalrõhu-eelsoojendid; 9 — madalrõhuökonomaiser; 10 — deaeraator; 11 — toitepump; 12 — kõrgrõhu-eelsoojendid; 13 — kõrgrõhuökonomaiser; 14 — auru separaator; 15 — tsirkulatsioonipump; 16 — gaasiturbiini kõrgrõhuosa; 17 — madalrõhuosa; 18 — kõrgrõhukompressor; 19 — õhujahuti; 20 — madalrõhukompressor; 21 — generaator.

1000-MW võimsusega auru-gaasi jõuseadmeid, gaasiastme parameetritega 20—40 ata, 900 °C ja auruastme parameetritega 300 ata, 650/580/565 °C. Selliste seadmete kasutegur võib küündida 45—47% -ni.

Auru-gaasi jõuseadmed, milles gaasid suunatakse gaasiturbiini katelseadmesse, võimaldavad kokku hoida kütust 4—6%. Selliste auru-gaasi elektrijaamade eeliseks on võimalus põletada katlas kivisütt.

Kui õnnestub tõsta kivisöe põletamisel soojuslikku erikoormust ja tõhustada põlemissaaduste puhastamist lendtuhast, saab võimalikuks ka auru-gaasi elektrijaamade loomine kompressioon-aurugeneraatoritega kivisöetolmu küttel. Tuleb märkida, et kivisöetolmu põletamine aurugeneraatori koldes on teostatav lihtsamate vahenditega kui gaasiturbiini põlemiskambris, sest kolde kambrit võib ekraanida veetorudega. Samuti on erosiooni probleem auru-gaasi seadmes veidi lihtsamalt lahendatav kui kivisöetolmuga töötava gaasiturbiiniseadme korral.

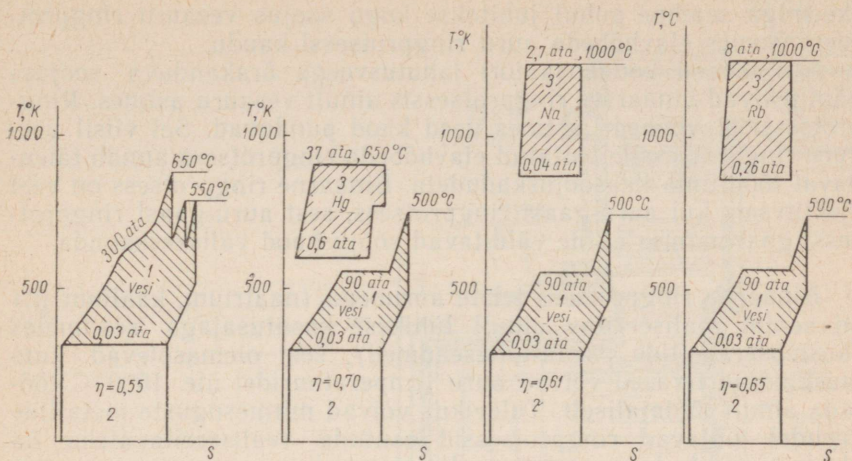
Käesoleval ajal töötatakse välja veel efektiivsemaid auru- ja gaasiturbiinidest koosnevaid kombineeritud seadmete skeeme. Spetsialistide grupp (I. I. Kirillov jt.) esitas binaarse (kahe vedelikuga) auru-gaasi jõuseadme skeemi, milles gaasiturbiini järel asuvast utilisatsioonkatlast saadav aur teeb tööd auruturbiinis, saab ülekuumenduse kõrgetemperatuurilise (1200—1500 °C) gaasiturbiini jahutussüsteemis ja teeb järgnevalt tööd tavalises kondensatsioon-auruturbiinis. Sellise seadme kasutegur võib tõusta üle 55%.

2. BINAARSED SEADMED

Gaasiringprotsessi ülestamine aururingprotsessile tõstab soojuse juurdejuhtimise keskmist temperatuuri, mille tulemusena tõuseb kombineeritud ringprotsessi kasutegur. Veeauru ringprotsessile on võimalik peale ehitada ka teist ringprotsessi auruga, mis on saadav kõrgema keemistemperatuuriga vedelikust. Sellist kombineeritud kahe vedelikuga ringprotsessi nimetatakse binaarseks. Binaarse ringprotsessi ülemises astmes võib kasutada metallide elavhõbeda, kaaliumi, naatriumi, liitiumi, tseesiumi, rubiidiumi jne. auru.

Aastal 1903 andis Peterburis avalduse P. V. Kožuev eesõiguse saamiseks tema leiutisele «Elavhõbeda auru jahutamiseks saadava elavhõbeda elava jõu kasutamise moodus». Leiutise autor esitas elavhõbeda auru katla elementide konstruktsiooni; oli ette nähtud elavhõbeda auru kasutamine turbiinis tema järgneva kondenseerimisega, kusjuures kondensaat (vedel elavhõbe) pidi pöörduma tagasi katlasse ilma pumbata, oma raskuse toimel.

Aastal 1912 ehitati USA-s esimene eksperimentaalne elav-



Joon. 41. Binaarsed ringprotsessid elavhõbeda, naatriumi ja rubiidiumi aurudel.

hõbeda auru katel ja 1923. a. esimene binaarne seade, millel oli elavhõbedaturbiin võimsusega 1800 kW ja veeauruturbiin võimsusega 1700 kW. Ajavahemikus 1928. a. kuni 1950. a. ehitati USA-s kuus binaarsete (elavhõbe-vesi) seadmetega elektriijaama võimsustega 20—52 MW ja tolle aja kohta rekordilise kasuteguriga 35—37% elavhõbeda auru algtemperatuuri juures kõigest 500—515 °C.

Aastal 1939 ehitati NSV Liidus eksperimentaalne elavhõbeda auru seade, mille abil uuriti elavhõbeda auru katelde, turbiinide, kondensaatorite, pumpade, armatuuri ja mõõteriistade elementide konstruktsioone. Selle seadme ekspluatatsioonikogemuste alusel saadi andmeid, mis on vajalikud tööstuslike binaarsete seadmete projekteerimiseks ja ehitamiseks. Binaarse ringprotsessi termodünaamilised eelised on ilmekalt näidatud joonisel 41. Veeauru ringprotsessi kasutegur algparameetritel 300 ata, 650/550/550 °C on 0,55. Binaarse ringprotsessi kasutegur samal elavhõbeda algtemperatuuril (650 °C) on 0,70.

Elavhõbeda ringprotsessis viiakse kütuse soojus protsessi konstantsel temperatuuril (nagu Carnot' ringprotsessis), mis tingibki ringprotsessi kõrge kasuteguri. Kogu töötanud elavhõbeda auru soojus antakse kondensaatoris jahutusveele kõrgel temperatuuril, mis võimaldab saada küllastunud auru. Rõhul 0,6 ata on elavhõbeda auru kondensatsioonitemperatuur 328 °C ja rõhul 0,12 ata 257 °C. Elavhõbeda auru kondensaator on samaaegselt vee auru-generaatoriks. Saadavat küllastunud veeauru võib üle kuumendada turbiini vaheltvõttust saadava elavhõbeda auruga. Sellise

skemiga seadme puhul juhitakse kogu soojus veeauru ringrotsessi üksnes elavhõbeda auru ringrotsessi kaudu.

Soojuskaod kondensaatori jahutusveega ärakanduva soojuse näol tekivad binaarses ringrotsessis ainult veeauru astmes. Ringrotsessi elavhõbeda astmes need kaod puuduvad. Sel viisil veeauru ringrotsessile ehitatud elavhõbeda ringrotsess annab täiendavat tööd ilma lisasoojuskadudeta. Binaarne ringrotsess on veel efektiivsem kui auru-gaasi ringrotsess, sest auru-gaasi ringrotsessi gaasiastmes ei ole välditavad soojuskaod väliskeskkonda.

Binaarne ringrotsess teiste aurudega (naatrium, kaalium jt.) on senini realiseeritav ainult lühikese kasutusajaga seadmetes (kosmoserakettide parda-toiteseadmed), sest olemasolevad kuumuskindlad terased võivad auru temperatuuridel üle 1000 °C töötada ainult lühiajaliselt. Tulevikus võivad mitmesuguste metallide aurudel töötavad ringrotsessid osutada realiseeritavateks ka elektriijaamade binaarsetes seadmetes.

Binaarse ringrotsessi kasutegur

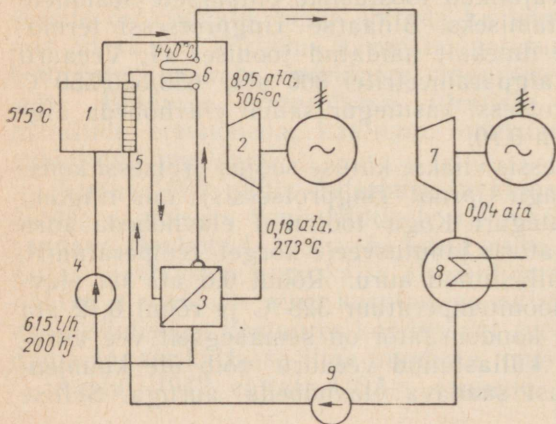
$$\eta_t = \frac{mH^{H_2O} + H^{H_2O}}{m(i_1^{H_2O} - q^{H_2O})} = \frac{\square 1 + \square 2}{\square 1 + \square 2 + \square 3}$$

kus H^{H_2O} ja H^{Hg} on entalpia langud ringrotsessi veeauru ja elavhõbeda auru osades;

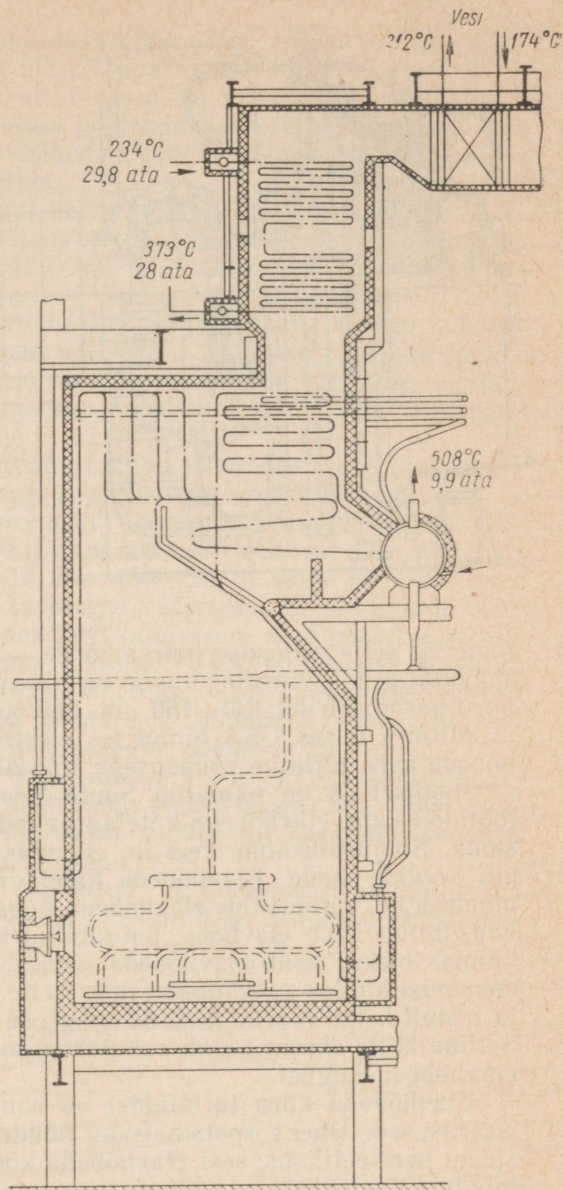
m — elavhõbeda auru ja veeauru koguste suhe;

q^{H_2O} — elavhõbeda kondensaadi entalpia.

Joonisel 42 on kujutatud USA-s 1950. a. ehitatud Shilleri elektriijaama binaarse (elavhõbe-vesi) jõuseadme soojuskeem. Kaks elavhõbeda katelagregaati tootlikkusega 450 t/h toodavad küllastunud auru parameetritega 10 ata, 515 °C. See aur teeb tööd kahes elavhõbeda auru turbiinis võimsusega à 7,5 MW ja konden-

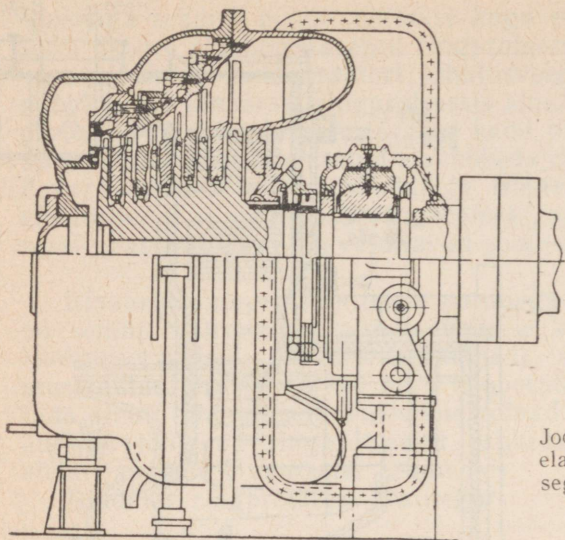


Joon. 42. Shilleri elektriijaama binaarse seadme soojuskeem: 1 — elavhõbeda-katelagregaat; 2 — elavhõbeda auru turbiin; 3 — kondensaator-aurusti; 4 — elavhõbedapump; 5 — veeökonomaiser; 6 — veeauru ülekuumendi; 7 — veeauru turbiin; 8 — veeauru kondensaator; 9 — toitevee pump.



Joon. 43. South-Meadow' elektrijaama elavhõbeda-katelagregaat aurutootlikkusega 750 t/h, 10 ata.

seerub seejärel kondensaatoraurustites, kus toodetakse 112 t/h külastunud veeauru rõhul 43 ata. Järgnevalt kuumutatakse seda auru elavhõbeda katelagregaadi gaasikäigus rõhul 42 ata temperatuurini 440 °C ja suunatakse veeauru turbiini võimsusega 25 MW. Binaarse seadme üldvõimsus on 40 MW. Seadme kasu-



Joon. 44. Pittsfieldi elektrijaama elavhõbeda auru turbiin võimsusega 7,5 MW.

tegur on selle võimsuse juures kõrge — 37,5%. Veeauruseadmetes saavutatakse selline kasutegur turbiini võimsusel 200—300 MW ja auru parameetritel 130—160 ata, 565/565 °C.

Mitmes teises USA binaarses elektrijaamas kasutatakse elavhõbeda auru turbiine võimsusega 15—20 MW.

Joonisel 43 on näidatud South-Meadow' elektrijaama 750-t/h tootlikkusega elavhõbeda-katelagregaadi parandatud konstruktsioon. Soojusülekanne keevale elavhõbedale on vähem efektiivne kui keevale veele. Elavhõbeda katelagregaadile esitatavaks erinõudeks on minimaalne elavhõbeda kogus. Seepärast on toru kimbud, milles keeb elavhõbe, paigutatud katla trumli kohale. Katla külmas olekus asub elavhõbeda nivoo allpool trumlit. Katla kuumenemise käigus elavhõbeda ning selle auru segu maht suureneb ja trumli kohal olevad kimbud ning osa trumlist täituvad seguga. Selline katla skeem tagab rahuldava soojusülekanne ja vähendab elavhõbeda kogust.

Elavhõbeda auru turbiinidel on samuti omad konstruktiivsed iseärasused. Üheks spetsiaalseks nõudeks on nende konstruktsiooni hermeetilisus, sest elavhõbeda kõrge toksilisuse tõttu ei ole lubatav elavhõbeda auru tungimine masinaruumi.

Joonisel 44 on näidatud Pittsfieldi binaarse elektrijaama 7,5-MW elavhõbeda auru turbiini konstruktsioon. Turbiinil on kuus rõhuastet. Tema rootor on kujundatud konsooli põhimõttel (ühe, paremal paikneva laagriga). Elavhõbeda auru sisenemise küljelt on turbiini kere suletud kaanega, mida võll ei läbi. Turbiini kere läbib ainult laagritele toetuv võlli ots. Elavhõbeda auru rõhk

on viimase astme järel madalam atmosfääri rõhust (0,195 ata) ja seetõttu ei ole võimalik elavhõbeda auru tungimine atmosfääri läbi võlli tihendi. Selle tihendi ülesandeks on takistada atmosfääri õhu tungimist turbiini kerele ja kondensaatorisse, sest elavhõbe oksüdeerub õhus ning elavhõbeda oksiidid võivad saastada elavhõbeda tsirkulatsiooni katlas.

Elavhõbeda auru turbiini hermeetilisuse tagamise teiseks variandiks on kahevooluline konstruktsioon. USA elavhõbeda auru turbiinid võimsusega 20 MW on kujundatud kahevoolulistena. Elavhõbeda aur antakse turbiini keskossa ja hargneb sealt kahte voolu, mis läbivad viis rõhuastet. Aur paisub rõhuni umbes 0,1 ata ja tihendid kummaski võlli otsas väldivad vaid õhu tungimist turbiini. Hermeetiliselt on kujundatud ka binaarse seadme ülejäänud agregaadid, armatuur, torustikud jne. Torud on ühendatud keevitamise teel.

Binaarse elektriijaama installeeritud võimsuse 1 kW maksumus on väiksem kui kõrgete alparameetritega veeauruseadmetes.

Perioodil 1945—1960 arenesid hoogsalt veeauruseadmed. Turbiinide võimsus kasvas 100-lt kuni 300—500 MW-ni, auru alparameetrid väärtustelt 60—100 ata, 450—500 °C kuni 160—250 ata, 540—560 °C, elektriijaama kasutegur väärtuselt 25—30% kuni 35—39%. Seoses sellega vähenes huvi binaarsete seadmete vastu. Viimastel aastatel on mõnedes maades (USA ja Itaalia) hakatud jällegi tegelema binaarsete seadmetega. USA-s on projekteeritud 500—1000-MW võimsusega binaarseid seadmeid. Auru alparameetritel 15 ata, 550 °C võib kasutegur küündida 50%-ni.

Juhtudel, kui kütus on defitsiitne ja kallis, võib oodata binaarsete elektriijaamade rajamist bloki võimsustega 500—1000 MW ja kasuteguriga üle 50%, mis ei ole saavutatav tavalistes veeauru jõuseadmetes ega gaasiturbiiniseadmetes.

Järgmises peatükis on näidatud, et kombineeritud binaarsed seadmed on eriti perspektiivsed kasutamiseks aatomielektriijaamades.

V peatükk

AATOMIELEKTRIIAAMAD

1. TUUMAREAKTSIOONID JA TUUMAENERGIA

Kõik looduses esinevad ained (tahked, vedelad, gaasilised) koosnevad väikseimatest osakestest — molekulidest, mis on pidevas liikumises. Molekulid on seotud omavahel tõmbe- ja tõukejõududega. Temperatuur on molekulide liikumist väljendav suurus. Paigalolekule vastab temperatuuri absoluutne null. Seliist kujutlust aine ehitusest nimetatakse molekulaar-kineetiliseks teooriaks. Selle alused rajati juba 1741—1743. aastatel esimese vene akadeemiku M. V. Lomonossovi poolt.

Kui aine molekul jagada koostisosadeks, siis saadakse teised ained. Vee molekul jaguneb elektrolüüsil vesinikuks ja hapnikuks. Ühe aine asemel saadakse kaks ainet. Molekul on antud aine väikseim osake.

Iga elemendi aatomi keskmes asub tuum, millesse on koondunud põhiline osa aatomi massist. Tuuma ümber asuvad elektronid — negatiivset elektrilaengut kandvad väikseimad osakesed. Aatomi tuumal on positiivne elektrilaeng, mis võrdub elektronide negatiivsete laengute summaga.

Aatomi tuuma laeng ja ümber tuuma paiknevate elektronide arv vastavad elemendi aatominumbrile Mendelejevi perioodilises süsteemis. Selle süsteemi esimese elemendi — vesiniku — aatomis on üks elektron ja tema tuuma laeng võrdub ühega. Heeliumi aatomil on kaks elektroni, tema laeng on kaks ja ta paikneb Mendelejevi tabelis teisel kohal. Uraani tuuma laeng on 92 ja tema tuuma ümber on 92 elektroni. Mendelejevi tabelis asub uraan 92. kohal.

Aatomi (tema elektronkesta) läbimõõt võrdub vaid ühe sajamiljondiku osaga sentimeetrist. Aatomi tuuma mõõtmed on veel 10 000—100 000 korda väiksemad.

Elementide keemilised omadused on määratud elektronide arvuga aatomis ja nende paiknemisega orbiitide järgi. Aatomi elektronkesta energia on väga väike, võrreldes tuuma energiaga. Soojus-, valgus-, keemilise ja elektromagnetilise energia eraldumine on seotud muudatustega aatomi elektronkesta. Seetõttu näiteks kütuse põlemisel eraldub suhteliselt väike energiakogus

võrreldes sellega, mida võib saada tuumareaktsioonidest. Aine kuumutamisel kõrge temperatuurini (2000—3000 °C) hakkavad aatomid kaotama väliseid elektrone. Soojuse eraldamine kütuse põletamisel on seotud kütuse ja hapendaja aatomite elektronkestade energia muutumisega. Näiteks süsiniku põlemisel toimub süsiniku aatomi ühinemine kahe hapniku aatomiga süsihappegaasi molekuliks. Süsiniku ja hapniku aatomid ühinevad keemiliste külgetõmbejõudude toimel, kusjuures toimub nende aatomite välise elektronkestade ühtimine. Aatomite teineteisele lähenemisega kaasneb alati energia eraldumine ja nende uuesti eemaldamine nõuab energia kulutamist. Tuumaenergia eraldumine on seotud elementaarosakeste ümberjaotumisega aatomi tuumas.

Aatomi tuum koosneb prootonitest ja neutronitest. Prooton on elementaarosake, mille mass on elektroni massist 1837 korda suurem. Tal on positiivne elektrilaeng, mille suurus on võrdne elektroni laenguga. Neutroni mass on peaaegu võrdne prootoni massiga (1839 elektroni massi), ent elektrilist laengut tal ei ole.

Kõige lihtsama aatomi — vesiniku—tuum koosneb ühest prootonist. Raske vesiniku (deuteeriumi) tuum koosneb ühest prootonist ja ühest neutronist. Uliraske vesiniku (tritiumi) tuumas on üks prooton ja kaks neutronit. Vesinik, deuteerium ja tritium on ühe keemilise elemendi — vesiniku isotoobid.

Kahe raske vesiniku aatomi ühinemisel hapniku aatomiga tekib raske vee molekul. Looduslikes veekogudes on umbes 0,2% rasket vett. Heeliumi aatomi tuum koosneb kahest prootonist ja kahest neutronist ja tema elektronkestas on kaks elektroni. Kerge heeliumi aatomi tuumas on kaks prootonit ja üks neutron. Rasketele (suure aatomkaaluga) elementide aatomite tuumad on keeruka struktuuriga ja mitmekihilise elektronkestaga. Näiteks uraani aatomis (Mendelejevi tabeli 92. element) on 92 prootonit, 146 neutronit ja elektronkest koosneb seitsmest kihist kokku 92 elektroniga.

Looduslik uraan koosneb kolmest isotoobist: uraan-234 (142 neutronit); uraan-235 (143 neutronit) ja uraan-238 (146 neutronit). Kõik kolm isotoopi on ühesuguse aatominumbriga (92 prootonit), ent erinevate massiarvudega (prootonite ja neutronite summa nende tuumades on vastavalt 234, 235 ja 238). Keemiliste meetoditega ei ole võimalik isotoope üksteisest eraldada.

Kõikidel elementidel aatominumbriga üle 83 on radioaktiivsed isotoobid.

Teatavates tingimustes esinevad prootonite ja neutronite vastastikused muundumised. Prooton võib näiteks muunduda neutroniks, kusjuures ta kiirgab välja positroni (positiivse tuumalaenguga elektroni) ja neutrino (osake, mille puudub elektriline laeng ja mille seisumass on peaaegu null). Neutron võib muunduda prootoniks, millega kaasneb elektroni ja antineutriino (neutriino antiosake) väljakiirgamine.

Aatomituuma prootonid ja neutronid on seotud tuumajõududega. Tuumaosakesi siduvad jõud on miljoneid kordi suuremad keemilisi ühendeid siduvatest jõududest. Raske elemendi aatomituuma jagunemisel toimub aatomisisese (tuuma-)energia eraldumine. Samuti eraldub tuumaenergia kergete elementide ühinemisel raskemaks tuumaks.

Tuuma moodustumise protsessis prootonitest ja neutronitest muundub osa nende osakeste paigalseisu massist energiaks. Relatiivsusteooriast on tuntud seos massi m ja energia E vahel:

$$E = mc^2 \text{ ergi,}$$

kus c on valguse levimise kiirus ($2,9979 \cdot 10^{10}$ cm/s).

Selle seose kehtivust on võimalik avastada üksnes väga suurte kiirustel. Suurtükimürsu kiirusel umbes 1000 m/s (10^5 cm/s) muutub mürsu mass ainult 10^{-11} osa võrra enda väärtusest. Nii väikese suuruse määramine mõõtmise teel ei ole võimalik. Täpselt samuti ei ole võimalik mõõta massi muutust keemilise reaktsiooni tulemusel tekkinud soojuse eraldumisel (näiteks süsiniku põlemisel süsihappegaasiks). Ühe ešloni kivisöe põletamisel on soojusenergia eraldumisega seotud massi muutus umbes 0,5 g.

Tuumareaktsiooni puhul esineva tohutu energia eraldumisel kujuneb massi muutus märgatavamaks suuruseks.

Kui prootonite ja neutronite masside summa on vabas olekus m_0 ja nende aatomi tuumaks ühinemisel saadav mass on m , siis kehtib seos

$$m_0 - m = \frac{E}{c^2}.$$

Sellest avaldisest võib leida aatomi tuuma sidemeenergia $E = 931$ MeV. Energia on siin väljendatud megaelektronvoltides (miljonites elektronvoltides). $1 \text{ MeV} = 3,83 \cdot 10^{17}$ kcal.

Suurust $m_0 - m$ nimetatakse massidefektiks (vähenemiseks). Kui aatomi tuumas on Z prootonit ja $A - Z$ neutronit, siis massidefekt on võrdne

$$Zm_p + (A - Z)m_n - m,$$

kus m_p on prootoni mass;

m_n — neutroni mass;

m — aatomi tuuma mass;

A — massiarv (prootonite ja neutronite summa aatomi tuumas).

Aatomi tuuma sidemeenergiat on hõlpsam määrata avaldisest $E = 931 [Zm_H + (A - Z)m_n - m]$ MeV.

Siin m_H on vesiniku aatomi mass.

Uraan-235 aatomi korral ($Z = 92$; $A = 235$) $E = 1762,5$ MeV.

U-235 tuum jaguneb kaheks killuks (aatomite tuumad Mendeleevi tabelis keskosast), kusjuures eraldub 2—3 vaba neutronit. Jagunemisel saadud neutronid kutsuvad esile järgmise kahe tuuma jagunemise, mille juures saadakse juba 4—6 vaba neutronit. Jagunevate tuumade kogus kasvab geomeetrilises progressioonis. Sellist reaktsiooni nimetatakse ahelreaktsiooniks.

Jagunemisel saadud kildude üldine sidemeenergia on 1957,2 MeV. Ühe U-235 tuuma jagunemisel eraldub energia

$$1957,2 - 1762,5 = 194,7 \text{ MeV.}$$

Ühes kilogrammis uraanis on $2,56 \cdot 10^{24}$ aatomit ja selle jagunemisel eraldub energia

$$194,7 \cdot 2,56 \cdot 10^{24} \text{ MeV} = 19 \cdot 10^9 \text{ kcal.}$$

See soojusekogus on ekvivalentne 2700 t kivisöe põletamisel eralduva soojusega.

Heeliumi tuuma sünteesil eraldub deuteeriumi tuumadest umbes 10 korda väiksem kogus soojust kui uraani aatomi tuuma jagunemisel. Ent heeliumi aatomikaal on 59 korda väiksem uraani aatomikaalust. Järelikult sisaldab 1 kg heelium 59 korda rohkem aatomeid kui 1 kg uraani. Selle tulemusel eraldub 1 kg heeliumi sünteesil deuteeriumist umbes 6 korda rohkem soojust kui 1 kg uraani jagunemisel. See on ekvivalentne 16 000 t kivisöe põletamisel saadava soojusega.

Kergeste elementide tuumade süntees raskemateks toimub väga kõrgetel temperatuuridel (100—200 milj. °C), mistõttu teda nimetatakse termotuumareaktsiooniks. Senini ei ole veel suudetud teostada juhitavat termotuumareaktsiooni, millega võiks vesiniku isotoopidest ja teistest kergeatest elementidest saada elektrienergiat. Mittejuhitavat (silmapilkset) termotuumade sünteesi reaktsiooni kasutatakse termotuumade (vesinik-)pommis.

2. TUUMAREAKTORITE EHITUSE JA TÖÖTAMISE PÕHIMÕTE

Tuumareaktoriks nimetatakse agregati, milles toimub uraani või plutooniumi aatomi tuumade jagunemise juhitav ahelreaktsioon. Eralduvat soojust võib kasutada elektrienergia tootmiseks.

Looduslik uraan (mida toodetakse uraani maagist) on segu kolmest isotoobist: U-234 (0,006%); U-235 (0,712%); U-238 (99,282%). Kui laadida tuumareaktor loodusliku uraaniga, siis uraani tuumade loomulikul lagunemisel eralduvad neutronid ei saa esile kutsuda ahelreaktsiooni, sest nende energia ei ole piisav U-238 tuumade lõhkumiseks; U-238 aga moodustab põhilise osa looduslikust uraanist.

Eristatakse kiireid neutroneid, mille kiirus on umbes 10 000 km/s, ja aeglasi (soojuslikke) neutroneid, mille kiirus on 2—4 km/s. Ainsaks isotoobiks, mis laguneb aeglaste neutronite toimel, on U-235. U-238 tuumad jagunevad ainult kiirete neutronite neelamisel, mille energia ületab 1,1 MeV. Kiirete neutronite energia, mis eralduvad U-235 jagunemisel, väheneb kiirelt 2 MeV-lt 1 MeV-ni. Seetõttu U-238 tuumade jagunemist ei toimu, kuigi nad neelavad neid neutrone.

Eriti intensiivselt neelduvad neutronid, mille kiirus on 40—50 km/h. Seda piirkonda nimetatakse resonantsneeldumise piirkonnaks. Just nimelt jagunemisel tekkivate neutronite resonantsneelamine U-238 tuumade poolt ei võimalda saada ahelreaktsiooni looduslikus uraanis, sest U-235 jagunemiseks ei piisa neutroneid.

Uraani-235 saab looduslikust uraanist-238 eraldada gaasidifusioonimeetodil, tsentrifuugimisega või elektromagnetiliselt. Gaasidifusiooniseadmes difundeerub uraani ühend gaasilises olekus järjestikku läbi suure arvu poorsete filtrite. U-235 ühendi molekuli difusioonikiirus on suurem kui raske isotoobi U-238 ühendi molekulidel. Seetõttu U-235 kontsentratsioon ühendis filtritest läbiminekul suureneb. Uraani rikastamise kõik meetodid nõuavad suuri kulutusi. Seetõttu on rikastatud uraani maksumus tuhandeid kordi kõrgem looduslikust uraanist, kusjuures ta on seda suurem, mida kõrgem on rikastusaste.

Energeetilistes reaktorites kasutatakse tavaliselt looduslikku uraani või uraani, mis on rikastatud kuni 1,5—2%, harvemini kuni 3—5%. U-235 tuuma lõhestamiseks piisab soojuslikkude neutronite energiast umbes 0,025 MeV. U-238 tuuma lõhestamiseks on vaja kiireid neutroneid energiaga 1,1 MeV ja rohkem. Looduslikus uraanis on iga U-235 aatomi kohta 140 U-238 aatomit. Seetõttu neutroni neeldumine U-235 tuumas on palju vähem tõenäoline kui tema sattumine U-238 tuuma.

Aeglase neutroni neeldumisel U-238 tuumas jagunemist ei toimu ja tuum muundub U-239 tuumaks (tuumas on juba 147 neutronit endise 146 asemel). Uraan-239 on ebastabiilne isotoop poolestusajaga 23 min. Radioaktiivse kiirguse poolestusajaks nimetatakse aega, mille vältel 50% aatomite tuumadest teeb läbi radioaktiivse muundumise. Käesoleval juhul üks U-239 tuuma neutronitest kiirgab välja elektroni ja muundub prootoniks ning aatomi elektronkesta ilmub täiendav elektron. Tuum, mis sisaldab 93 prootonit, ei ole uraani tuum, vaid keemilise elemendi — neptuuniumi tuum (Np-239). See on samuti ebapüsiv radioaktiivne element poolestusajaga 2,4 ööpäeva. Np-239 laguneb radioaktiivselt, kiirates välja elektroni, kusjuures üks neutron muundub prootoniks. Tekib 94 prootoniga plutooniumi tuum (Pu-239). Tekkinud plutoonium on püsiv radioaktiivne isotoop, mis võib jaguneda nii kiirete kui ka soojuslikkude neutronite toimel.

Soojuslikel neutronitel töötavas reaktoris, milles kasutatakse looduslikku või vähe rikastatud uraani, toimub U-235 tuumade «ärापõlemine» koos soojuse eraldumisega ja samaaegse plutooniumi moodustumisega U-238 tuumadest. Osa plutooniumi tuumadest «põleb» samuti ära, eraldades soojust, osa aga koguneb reaktoris ja pärast viimase tühjendamist võib seda eraldada keemiatehases uraanist ning jagunemise saadustest.

Reaktoreid, mis on projekteeritud samaaegseks elektrienergia tootmiseks ja plutooniumi saamiseks, nimetatakse kaheotstarbelisteks.

Reaktoris võib saada ka teist «sünteesilist» kütust — uraani-233. See uraani isotoop ei esine looduses. Tema saamisel reaktoris on tooraineks toorium (Th-232) — element aatominumbriga 90. Tooriumi tuum muundub neutroni neeldumisel ebapüsivaks isotoobiks Th-233 poolestusajaga 23,5 min. Üks tema tuuma neutronitest kiirgab välja elektroni ja muundub prootoniks. Element, mille tuumas on 91 prootonit, protaktiinium (Pa-233), on radioaktiivne isotoop. Tema tuuma üks neutronitest muundub prootoniks, kiirates uuesti välja elektroni. Tekib element aatominumbriga 92 — uraan 233. Selle, uraani kunstliku isotoobi tuum jaguneb nii kiirete kui ka soojuslike neutronite toimel.

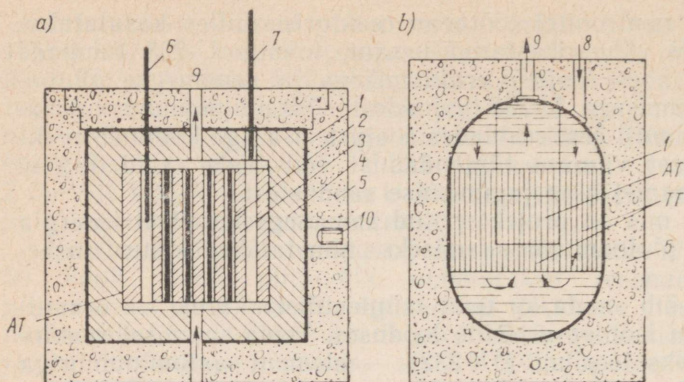
Et vältida neutronite sattumist resonantsi piirkonda, tuleb vähendada nende kiirust kuni molekulide soojusliku liikumise kiirusele. Selle saavutamiseks kasutatakse neutronite aeglusteid — väikese aatomikaaluga materjale, mille tuumadega kokku põrgates neutronid kaotavad suure osa oma kiirusest. Neutronite aeglustina kasutatakse vett, rasket vett, grafiiti ja berülliumi.

Aeglusti kasutamine suurendab tõenäosust, et neutron neelatakse U-235 tuuma poolt. Neutronite neeldumise tõenäosust U-235 tuumades suurendab ka loodusliku uraani rikastamine (U-235 kontsentratsiooni tõstmine väärtuselt 0,712%-lt kuni 1,5—2%-ni ja rohkem).

Jagunemise ahelreaktsioon võib tekkida tingimusel, et reaktoris on viidud mingi minimaalne jaguneva materjali kogus, mida nimetatakse kriitiliseks massiks. Puhta U-235 korral on kriitilise massi väärtuseks mõned kilogrammid. Maailma esimese aatomi-elektrijaama reaktoris on kriitiline mass umbes 13 kg U-235.

Tuumareaktori ehituse põhimõte selgub joonisest 45. Tema põhilisteks konstruktsioonelementideks on tuumakütusega aktiivne tsoon, neutronite peegeldi, juhtimis- ja kaitsesüsteem, soojuse väljajuhtimise süsteem, soojuslik kaitse, bioloogiline kaitse, tuumakütuse sisse- ja väljaviimise süsteem.

Soojuslikel neutronitel töötavas reaktoris on aktiivses tsoonis peale tuumakütuse ja soojuskandja ka neutronite aeglusti. Kiiretel neutronitel töötavas reaktoris aeglusti puudub. Sellises reaktoris on aktiivses tsoonis rikastatud tuumakütus (uraan, plutoonium). Ümber aktiivtsooni paikneb taastootmise tsoon, milles loo-



Joon. 45. Tuumareaktorite konstruktsioonide skeemid: *a* — aeglastel neutronitel; *b* — kiiretel neutronitel (*1* — reaktori korpus; *2* — soojust eraldavad elemendid; *3* — neutronite aeglusti; *4* — neutronite peegeldi; *5* — bioloogiline kaitse; *6* — reguleerimisvardad; *7* — avariikaitsevardad; *8* — soojuskandja sisenemine; *9* — soojuskandja väljumine; *10* — ionisatsioonkamber; *AT* — aktiivtsoon; *TT* — taastootmistsoon).

duslikust uraanist või tooriumist toodetakse vastavalt plutooniumi või U-233.

Soojusliku grafiitreaktori aktiivtsoonis on varda-, silindri- või plaadikujulised tuumakütust sisaldavad soojust eraldavad elemendid paigutatud grafiitkanalitesse. Soojust eraldavate elementide ja kanali (toru) seinte vahel voolab soojuskandjana vesi, gaas või vedel metall (naatrium, kaaliumi ja naatriumi sulam).

Gaasiliste soojuskandjatena kasutatakse süsihappegaasi, heeliumi või lämmastikku. Osa kanaleid kasutatakse juhtimis- ja kaitsevarraste jaoks (reguleerivad, kompenseerivad, avariivardad) ning ionisatsioonkambrite või neutroniloenduri paigutamiseks.

Ümber aktiivtsooni paiknevad neutronite külge- ja otspeegeldid, mis on valmistatud grafiitplokkidest (tellistest) ja takistavad neutronite väljalendamist aktiivtsoonist. Vesijahutusega reaktori-tes on neutronite aeglustiks ning soojuskandjaks vesi.

Aktiivtsoonis toimub U-235 tuumade jagunemise ahelreaktsioon. Osaliselt võib toimuda ka U-238 tuumade jagunemine. Soojust eraldavaid elemente sisaldavad kanalid võivad asetseda nii vertikaalselt kui ka horisontaalselt.

Ahelreaktsioonis eralduv soojus juhitakse aktiivtsoonist välja soojuskandjaga, mis pannakse liikuma läbi kanalite pumpade või ventilaatoritega. Grafiidi kaitsmiseks ärapõlemise eest paigutatakse ta hermeetilisse kesta, mis on täidetud inertse gaasiga (heelium, lämmastik).

Reaktori kest on ümbritsetud bioloogilise kaitsega, milleks on betoon paksusega 2–3 m ja mis kaitseb elektriijaama personali

kiirituse eest. Betooni lagunemise vastu aktiivtsooni kiirguse toimel on betoonkatte siseküljel soojuslik kaitse — teraslehtedest pinnakate. Reaktorisse sisseviidava kütuse kogus ületab mitmekordselt kriitilise massi, sest tuleb tagada reaktiivsust kogu reaktori tsükli kestuseks (2—3 aastat). Reaktori võimsus võib olla konstantne siis, kui on konstantne kütuse tuumade jagunemiste arv ajaühikus. Ahelreaktsioon on võimalik tingimusel, et jagunemisel saadavate neutronite hulk veidi ületab neelatavate neutronite kogust (neutronite juurdekasvu tegur on suurem ühest).

Reaktori täitmisel värske kütusega tuleb vähendada jääkreaktiivsust, mida saavutatakse neutroneid neelavast materjalist (boor, boor-teras jt.) kompenseerivate varraste viimisel aktiivtsooni. Vastavalt U-235 väljapõlemisele tõstetakse need vardad aktiivtsoonist välja ja taastatakse sellega vajalik reaktiivsus.

Reaktori etteantud töörežiimi täpne hoidmine toimub automaatreguleerimisvarrastega.

Automaatreguleerimisvardaid liigutatakse servomootorite abil, mis saavad komando (impulsi) ionisatsioonikambritest või neutronite loenduritest. Gaasiga täidetud ionisatsioonikambri põhjustavad kiirelt liikuvad laetud osakesed elektrodidevahelise pinge langemist. Elektrodide ahelas tekkiv pingelang on võrdeline gaasi ioniseerivate osakeste voolutiheduse muutusega.

Booriga kaetud elektrodide pind neelab neutroneid, mis tekitab α -osakeste voolu. Seetõttu on voolu tugevuse muutus ahelas võrdeline neutronite voolutiheduse muutusega.

Ionisatsioonikambrite ahelas tekkiv nõrk vool võimendatakse elektronvõimendis. Kui neutronite vool reaktoris suureneb, laseb servomootor varda aktiivtsooni. Neutronite voolu vähenemisel tõmbab servomootor varrast aktiivtsoonist välja.

Tekkivate plutooniumi aatomite arvu ja «väljapõlenud» uraani aatomite arvu suhet nimetatakse taastootmisteguriks. Soojuslikkul neutronitel töötavates reaktorites on taastootmistegur 0,3—0,5. Kiiretel neutronitel töötavates reaktorites küünib see tegur väärtusteni 1,8—2,0. Seetõttu nimetatakse selliseid reaktoreid paljundusreaktoriteks.

3. AATOMIELEKTRIJAAMADE SOOJUSSKEEMID JA SISSESEADE

Maailma esimene aatomielektriijaam anti eksploatatsiooni 27. juunil 1954. aastal Obninski linnas. 30-MW soojusvõimsusega reaktori grafiitplokkidest valmistatud aktiivtsooni läbimõõt on 1,5 m ja kõrgus 1,7 m. Aktiivtsooni ümber paiknevad neutronite külge- ja otspeegeldid, mis on samuti valmistatud grafiitplokkidest. Müürituse välisläbimõõt on 3 m ja kõrgus 4,6 m. Aktiivtsooni ja otspeegeldeid läbivad 157 vertikaalset kanalit läbimõõduga

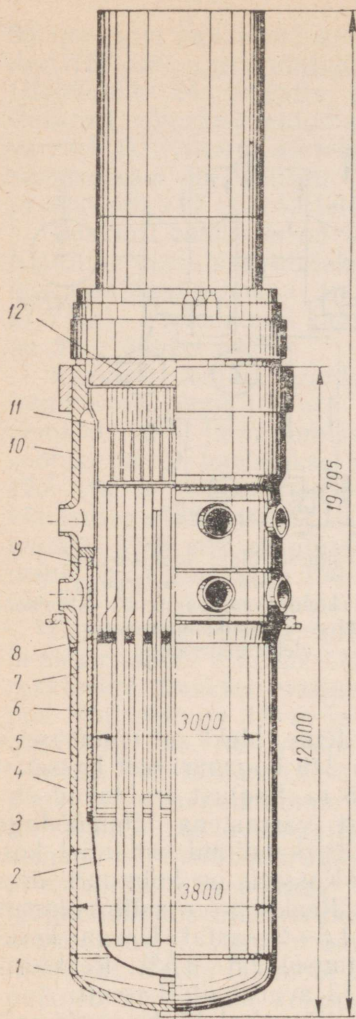
65 mm, mis paiknevad kolmnurkvõreana sammuga 120 mm. Nendest 128-sse on paigutatud torutüüpi soojust eraldavad elemendid. Ülejäänud 24 kanalit on boorkarbiidist reguleerimisvardad. Reaktori võimsuse automaatreguleerimiseks on paigutatud neli varrast aktiivsooni äärtele. Kätsi reguleeritavad 18 kompensatsioonvarrast on osaliselt (6 tk.) paigutatud aktiivsooni keskele ja osaliselt (12 tk.) äärtele. On kaks avariivarrast.

Reaktori täidiseks on 550 kg kuni 5%-ni rikastatud uraani. Kriitiline mass saavutatakse 60 kanali täitmisel värske kütusega, mis sisaldavad kokku umbes 13 kg U-235 (üldisest kogusest 27,5 kg). Plutoniumi taastootmistegur on 0,32. Uraan-235 kulu on 30 g ööpäevas.

Reaktori soojust eraldavate elementide torudes tsirkuleerib jahutusvesi rõhul 100 ata. Tema temperatuur on reaktorisse sisenemisel 190 °C ja väljumisel 280 °C. Vee kulu on 240 t/h. Selle vee soojuse arvel toodetakse aurugeneraatorites 42 t/h auru rõhul 12,5 ata ja temperatuuril 265—270 °C, mis teeb tööd turbiinis võimsusega 5000 kW. Elektriijaama kasutegur on 15—17%. Septembris 1958 anti ekspluatatsiooni Siberi aatomielektriijaama esimene järk võimsusega 100 MW. Selle elektriijaama täisvõimsus on üle 500 MW. Tema reaktorid on samuti grafiit-vesi-tüüpi.

Septembris 1964. a. anti ekspluatatsiooni Novo-Voroneži aatomielektriijaama esimene blokk võimsusega 210 MW vesi-vesitüüpi reaktoriga. Reaktori soojuslik võimsus on 760 MW. Reaktori korpus läbimõõduga 3,8 m ja kõrgusega 11,2 m on arvestatud siserõhule 100 ata. Aktiivsoon läbimõõduga 3 m ja kõrgusega 2,5 m koosneb 343 kuusnurksest kassetist soojust eraldavate elementidega, mis asuvad kolmnurkvõres sammuga 147 mm. Aktiivsoonis on samuti kuus avariikaitse kassetti. Kassetid on 2 mm paksuse seinaga tsirkooniumtorudest, mis on deformeeritud kuusnurkseteks prismadeks läbimõõduga 144 mm. 2,5 mm pikkused ja 8,8-mm läbimõõduga soojust eraldavad elemendid sisaldavad paakunud uraandioksiidi. Vardaid ümbritseb nioobiumiga legeeritud tsirkooniumkest. Varda läbimõõt koos kattega on 10,2 mm. Igas kassetis paikneb 91 varrast kolmnurkvõres sammuga 14,3 mm. Reaktori töötükli arvutuslik kestus on 1,5 aastat. Algtäidis koosneb 23 tonnist kuni 1,5% rikastatud uraanoksiidist ja 17 tonnist looduslikust uraanoksiidist (ümber arvatult metallilise uraani masile).

Reaktoris tsirkuleerib 27 300 m³/h jahutusvett, mis on samaaegselt neutronite aeglustiks. Vee temperatuur on reaktorisse sisenemisel 250 °C ja väljumisel 275 °C, tema rõhk on 100 ata. Aurugeneraatorites toodetakse küllastunud auru rõhul 32 ata. Ta saabub turbiini rõhul 29 ata ja paisub kõrgrõhusilindris, seejärel läbib separaatori (veepiiskade eemaldamiseks) ja läheb madalrõhusilindrisse (joon. 46). Aatomielektriijaama kasutegur on 27,6%.



Joon. 47. Novo-Voroneži aatomi-elektrijaama teise bloki reaktor: 1 — šahti ja korpuse kinnituspolt; 2 — reguleerimissüsteemi kassett; 3 — šahti põhi; 4 — ekraan; 5 — töökassett; 6 — šaht; 7 — väljavõetav korv; 8 — distantsvõre; 9 — kaitsetorude blokk; 10 — korpuse; 11 — temperatuuri kontrollsüsteemi torud; 12 — väljavõetav blokk.

ritis (joon. 48) läbimõõduga 8,7 m ja kõrgusega 9,7 m paikneb teraskestas. Müüritis on 1004 vertikaalset kanalit, mis paiknevad ruutvõrena sammuga 200 m. Kuues kanal on automaatsreguleerimisvardad, 78 kanal on kompensatsioonvardad, 16 kanal on avariivardad ja 36 kanal on ionisatsioonkambrid.

Töötavad kanalid koosnevad kuuest torukujulisest soojust eraldavast elementist, mis on paigutatud grafiitpuksi. Elementide välisläbimõõt on 20 mm, toru siseläbimõõt 9,4 mm ja seina paksus 0,6 mm.

998-st töötavast kanalist jahutatakse 730 keeva veega ja 268 kanalit auruga. See on esimene reaktor, milles auru ülekuumendus toimub aktiivsoonis. Aurustuskanalitesse antakse vesi tsentraalitoru kaudu; auru-vee segu tõuseb üles kuue perifeerse toru kaudu. Auru ülekuumenduse kanalitel tsentraalitoru puudub ja aur läheb alla mööda kolme toru ja seejärel üles jällegi mööda kolme toru.

Vee rõhk aurustuskanalites on 150 ata, temperatuur sisenemisel 300 °C ja väljumisel 340 °C. Ülekuumenduskanalitesse siseneb aur temperatuuril 320 °C ja rõhul 115 ata ning kuumeneb temperatuurini 500—510 °C.

Kütuseks on uraani ja molübdeeni sulami tükid, kusjuures uraani on rikastatud 1,8%-ni. Kütuse mass on 67 t. Reaktori soojusvõimsus on 286 MW.

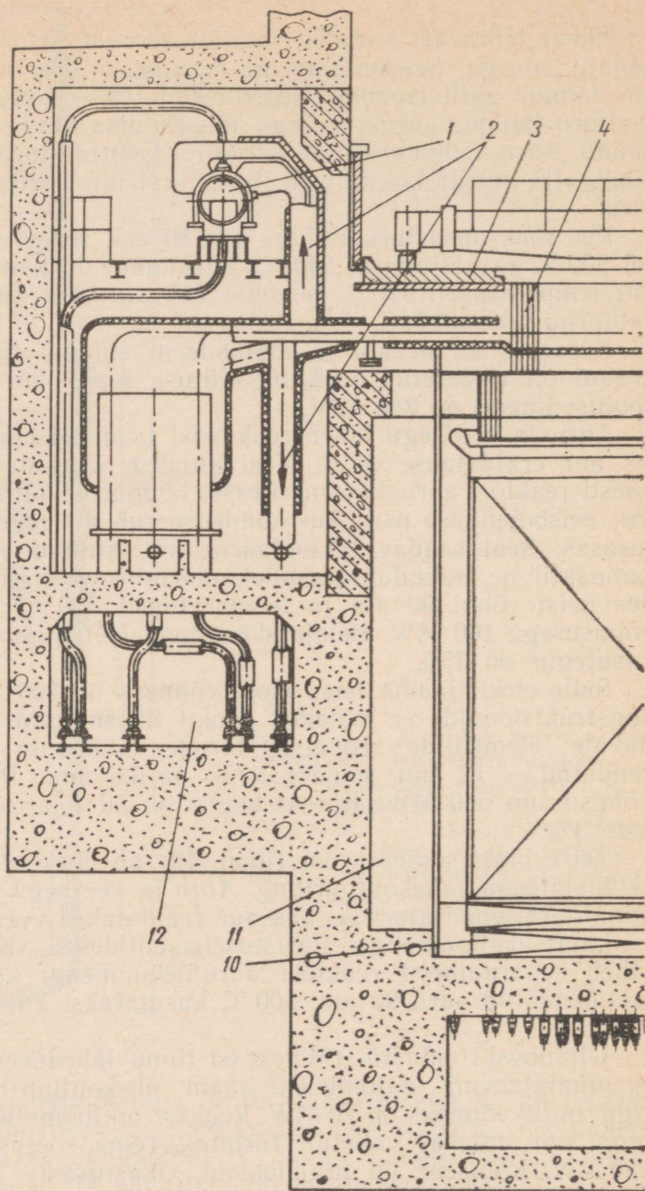
Auru ja vee segu läheb reaktorist trummelseparaatorisse, milles aur eraldatakse veest. Vesi antakse tsirkulatsioonipumbaga uuesti reaktori aurustuskanalitesse, läbinud eelnevalt aurugeneraatori eelsoojenduse osa. Aur kondenseerub aurugeneraatori aurustusosas. Seal saadav sekundaarne küllastunud aur, mis ei ole radioaktiivne, suundub auruülekuumenduse kanalitesse ja, väljudes neist rõhul 90 ata ja temperatuuril 500 °C, läheb turbiini võimsusega 100 MW. Belojarski aatomielektriijaama esimese bloki kasutegur on 35%.

Selle elektriijaama teise bloki võimsus on 200 MW. Reaktorite konstruktsioonid on mõlemal blokil ühesugused. Soojust eraldavate elementide sisemiste torude läbimõõtu on veidi suurendatud — 12 mm, seinapaksus on 0,6 mm. Reaktori soojusvõimsus on 560 MW. Kütuse kogus on 50 t ja uraani rikastusaste 3%.

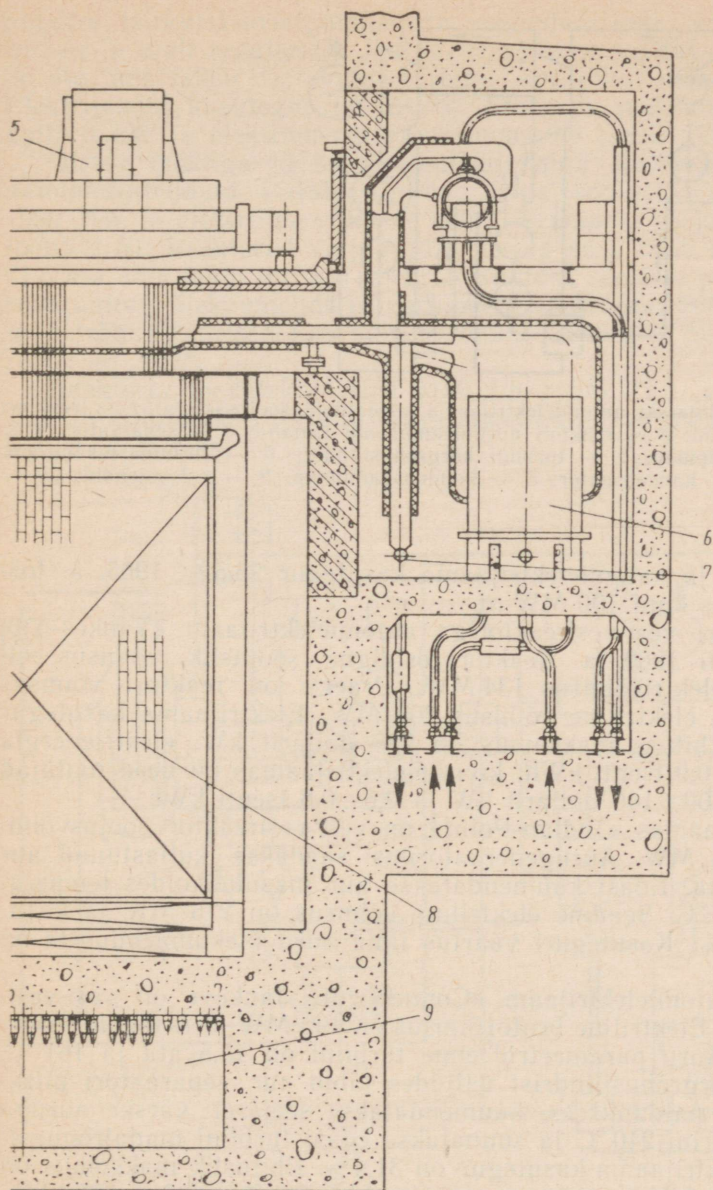
Teise bloki soojusskeem (joon. 49) on ühekontuuriline, esimesel blokil aga kahekontuuriline. Auru ja vee segu läheb aurustuskanalitest separaatorisse, kus aur eraldatakse veest. Vesi antakse tsirkulatsioonipumbaga aurustuselementidesse. Küllastunud aur läheb separaatorist reaktori auruülekuumendi kanalitesse. Ülekuumendatud auru 90 ata, 500 °C kasutatakse kahes 100-MW turbiinis.

Uljanovski oblastis (Melekessi linna läheduses) anti 1965. a. eksploatatsiooni aatomielektriijaam ühekontuurilise keevreaktoriga, mille võimsus on 70 MW. Reaktor on loomuliku tsirkulatsiooniga; aur antakse vahetult turbiini. Tema soojuslik võimsus on 250 MW, kütuseks on uraanoksiid, rikastusaste 1,5—2%. Selle aatomielektriijaama soojusskeem on esitatud joonisel 50.

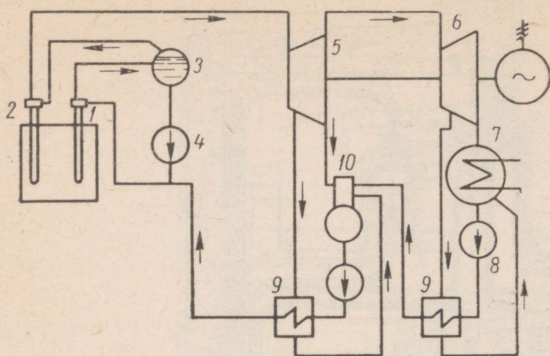
USA-s eksploateeritakse ja ehitatakse aatomielektriijaama vesi- ja keevreaktoritega. Esimene vesi-vesireaktoriga jaam ehitati Shippingportis 1957. a. Reaktori konstruktsioon ja seadme soojusskeem on samasugused kui Novo-Voroneži aatomielektriijaamal. Reaktori soojusvõimsus on 200 MW. Auruturbiini võimsus



Joon. 48. Belojarski aatomielektrijaama esimese bloki reaktor: 1 — auruseparaator; 2 — torustikud; 3 — ülemine kate; 4 — ülemine plaat; 5 — ülelaadimise masin; 6 — armatuuri teenindamise koridor; 7 — peatorustikud; 8 —



grafiittäidis; 9 — juhtimissüsteemi varraste käivituse mehhanismide koridor;
 10 — alumine plaat; 11 — kaitsev veekiht; 12 — ülekuumendatud auru kollektorid.



Joon. 49. Belojarski aatomielektriijaama teise bloki soojuskeem: 1 — reaktori aurustuskanalid; 2 — reaktori auruülekuumendi kanalid; 3 — separaator; 4 — tsirkulatsioonipump; 5 — turbiini kõrgrõhusilinder; 6 — turbiini madalrõhusilinder; 7 — kondensaator; 8 — kondensaadipump; 9 — eelsoojendid; 10 — deaeraator.

on 60 MW ja aatomielektriijaama kasutegur 26,5%. 1965. a. tõsteti võimsus kuni 100 MW-ni.

Järgmine vesi-vesireaktoriga aatomielektriijaam «Yankee-Atomic» ehitati 1960. a. Reaktori esialgne soojuslik võimsus oli 480 MW, elektrivõimsus 134 MW. Praegu on reaktori võimsus 600 MW ja elektriline võimsus 200 MW. Elektriijaama kasutegur on 29%. Ehituse maksumus on 228 dollarit kW, elektrienergia maksumus 0,9 tsenti kWh; kivisöe-elektriijaamas on need näitajad vastavalt 100—140 dollarit kW ja 0,6—0,8 tsenti kWh.

Elektriijaamas «Indian-Point» on vesi-vesireaktor soojusvõimsusega 585 MW. Aurugeneraatorites saadakse küllastunud aur rõhul 30 ata. Edasi kuumendatakse aur masuudikoldes temperatuurini 537 °C. Seadme elektriline võimsus on 275 MW ja kasutegur 31,8%. Kasuteguri väärtus ilma auru ülekuumendusega on 26%.

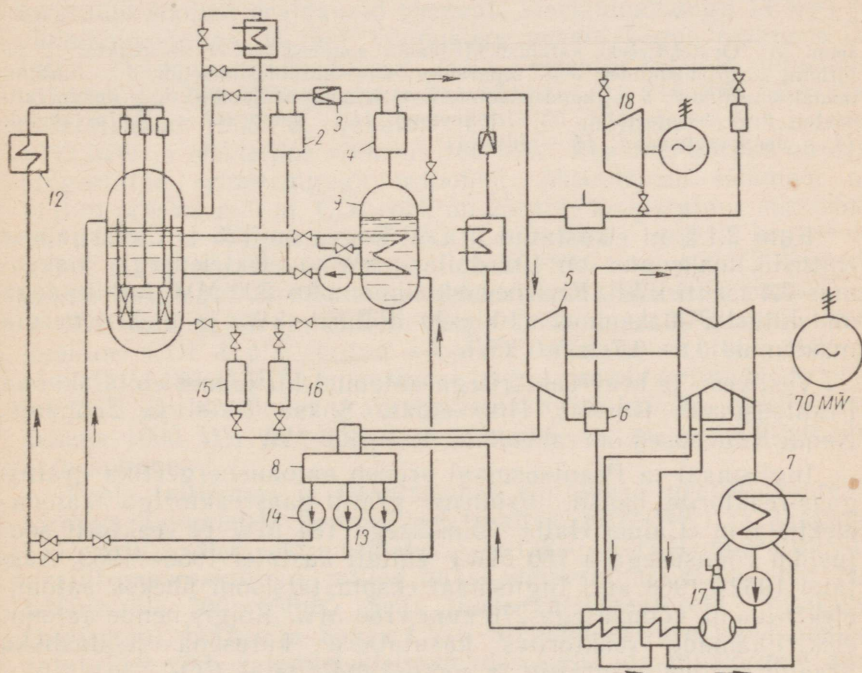
USA aatomielektriijaam «Connecticut Yankee» on vesi-vesireaktoriga. Elektriline brutovõimsus on 490 MW ja netovõimsus — 462 MW. Auru parameetrid enne turbiini on 48,5 ata ja 161 °C. Turbiini kõrgrõhusilindrist väljudes läbib aur separaatori piiskniiskuse eemaldamiseks, kuumendatakse seejärel värske auruga temperatuurini 240 °C ja suunatakse edasi turbiini madalrõhuastmesse. Elektriijaama kasutegur on 31,4%. Ehituslik maksumus on 191 dollarit kW ja elektrienergia maksumus 0,5—0,6 tsenti kWh.

Esimene tööstuslik keevreaktoriga aatomielektriijaam USA-s ehitati 1959. a. Reaktori esialgne soojusvõimsus oli 630 MW ja elektrivõimsus 180 MW. Praegu on soojusvõimsus 700 MW ja elektrivõimsus 200 MW. Auru ja vee segu rõhul 71 ata läheb reaktorist separaatorisse. Aur läheb sealt turbiini rõhul 63 ata ja vesi

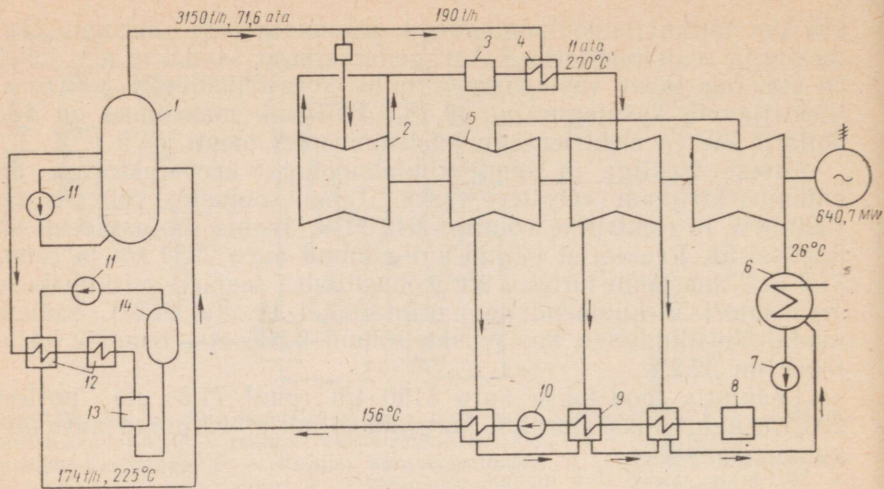
antakse tsirkulatsioonipumpadega sekundaarsesse aurugeneraatorisse ja sealt reaktorisse. Aurugeneraatorist saadakse aur rõhul 36 ata, mis läheb vastavasse turbiini kõrgrõhusilindri astmesse. Elektri jaama kasutegur on 29,3%. Ehituslik maksumus on 183 dollarit kW ja elektrienergia maksumus 0,9 senti kWh.

Otseste tsükliga ja sundtsirkulatsiooniga keevreaktoriga on aatomielektri jaam «Oyster-Creek». Tema soojuslik võimsus on 1990 MW ja elektriline võimsus 640 MW. Jaama soojuskeem on joonisel 51. Reaktorist väljub küllastunud auru 2950 t/h ja rõhul 71,5 ata, mis läbib turbiini kõrgrõhusilindri, seejärel piiskniiskuse separaatori, ülekuumendi ja parameetritel 11 ata, 268 °C saabub madalrõhusilindrisse, kus paisub rõhuni 0,035 ata. Seadme kasutegur on 32,2%.

Reaktoris toodetakse auru 3150 t/h rõhul 71,5 ata, millest 200 t/h kulutatakse turbiini kõrgrõhusilindrist väljunud auru ülekuumendamiseks.



Joon. 50. Melekeši 70-MW keevreaktoriga aatomielektri jaama soojuskeem: 1 — reaktor; 2 — kõrgrõhuseparaator; 3 — drosselklapp; 4 — keskrõhuseparaator; 5 — küllastunud auru turbiin; 6 — niiskuseseparaator; 7 — kondensaator; 8 — deaeraator; 9 — aurugeneraator; 10 — abikondensaator; 11 — möödalaskekondensaator; 12 — aurusti; 13 — pump; 14 — toitepump; 15 — aurusti; 16 — ioonvahetusfilter; 17 — ežektor; 18 — ülekuumendatud auru turbiin.



Joon. 51. Oyster-Creeki aatomielektrijaama soojuskeem: 1 — reaktor; 2 — turbiini kõrgrõhusilinder; 3 — separaator; 4 — auruülekuumendi; 5 — turbiini madalrõhusilinder; 6 — kondensaator; 7 — kondensaadipump; 8 — demineralisaator; 9 — eelsoojendid; 10 — toitepump; 11 — pump; 12 — soojusvahetid; 13 — demineralisaator; 14 — filter.

Kuni 2,1% -ni rikastatud uraani kogus on 125 t. Elektrijaama ehituslik maksumus on 104 dollarit kW ja elektrienergia maksumus 0,4 tsendi kWh. Kivisöe-elektrijaamades 500-MW turbiinidega on ehituslik maksumus 110–120 dollarit kW ja elektrienergia maksumus 0,6–0,7 tsendi kWh.

Vesi-vesi- ja keevreaktoritega aatomielektrijaamu ehitatakse ka Prantsusmaal, Itaalias, Hispaanias, Saksa FV-s ja Jaapanis. Nende võimsused on vahemikus 150–400 MW.

Inglismaal ja Prantsusmaal areneb aatomienergeetika grafiit-gaas-reaktorite baasil. Esimene grafiit-gaasreaktoriga aatomielektrijaam «Calder-Hall» võimsusega 184 MW (4 reaktorit soojusliku võimsusega à 180 MW) ehitati aastatel 1956–1959. Aastatel 1962–1968 anti Inglismaal ekspluatatsiooni üheksa aatomielektrijaama võimsusega 276 kuni 1180 MW. Kõigis nende aatomielektrijaamade reaktorites kasutatakse kütusena looduslikku uraani, aeglustina grafiiti ja soojuskandjana — CO₂.

Esimestes elektrijaamades valmistati reaktorite korpused 50 mm paksustest teraslehtedest keeviskonstruktsioonina, kusjuures silindrilise korpuse läbimõõt oli 12 m ja CO₂ rõhk 8 kg/cm². Hilisemates aatomielektrijaamades on reaktori korpused kerakujulised. Viimastes jaamades on korpused valmistatud raudbetoonist ja vooderdatud seestpoolt lehtterasega.

Joonisel 52 on näidatud aatomielektriijaama «Hinkley Point» reaktori osakond, kuhu on paigutatud kaks reaktorit soojusvõimsusega à 966 MW ja elektrivõimsusega à 250 MW. Reaktori sfäärilise korpuse läbimõõt on 20,4 m, seina paksus 76 mm ja tema mass 1700 t.

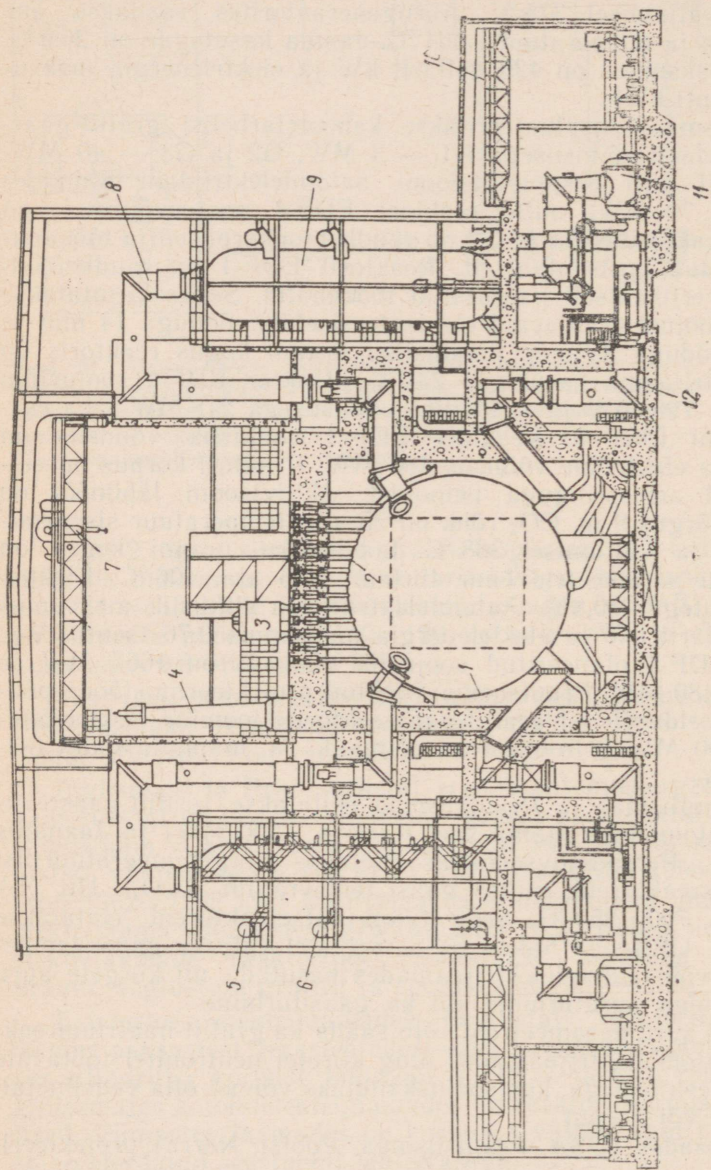
CO₂ rõhk on reaktoris 13 kg/cm², temperatuur sisenemisel 180 °C ja väljumisel 375 °C. Aurugeneraatorites saadakse aur rõhul 45 ata ja temperatuuril 364 °C. Jaama kasutegur on 26,9%. Ehituslik maksumus on 420 dollarit kW ja elektrienergia maksumus 1,2 tsenti kWh.

Prantsusmaal ekspluateeritakse kaheotstarbelisi grafiit-gaasreaktoreid elektrivõimsusega G1 — 3 MW, G2 ja G3 — 40 MW. 1962. aastal anti ekspluatatsioonile aatomielektriijaam Shinõnes võimsusega 70 MW, mille reaktori EDF-1 soojusvõimsus on 300 MW. Reaktorites G1 ja G2 on raudbetoonkorpused ja töökanaalid paigutatud horisontaalselt. Reaktoril EDF-1 on raudbetoonkorpused ja vertikaalselt paigutatud töökanaalid. Selles kasutatakse torutüüpi soojust eraldavaid elemente siseläbimõõduga 14 mm ja välisläbimõõduga 35 mm. Loodusliku uraani kogus reaktoris on 140 t; elektriijaama kasutegur 23,3%. Reaktor EDF-2 soojusliku võimsusega 790 MW ja elektrilise võimsusega 218 MW läks ekspluatatsioonile 1965. a. Reaktori EDF-3 soojuslik võimsus on 1560 MW ja elektriline võimsus 480 MW. Reaktori korpus on eel-pingestatud armeeringuga betoonist. Aktiivtsooni läbimõõt on 11,3 m ja kõrgus 9 m. CO₂ rõhk on 25 ata; temperatuur sisenemisel 241 °C ja väljumisel 388 °C. Loodusliku uraani kogus on 400 t. Auru parameetrid enne turbiini 53,6 ata, 406 °C. Elektriijaama kasutegur 30,8%. Aatomielektriijaama ehituslik maksumus on 202 dollarit kW ja elektrienergia maksumus 0,76 tsenti kWh. Reaktori EDF-4 planeeritud soojuslik võimsus on 1667 MW ja elektriline 480 MW. Prantsusmaal tehtud projekteerimistööde põhjal jõuti järeldusele, et grafiit-gaasreaktorite loomine elektrivõimsusega 1000 MW ja rohkem on võimalik ja majanduslikult otsustarbekohane.

Peale Inglismaa ja Prantsusmaa ehitatakse grafiit-gaasreaktoritega aatomielektriijaamu veel Itaalias (200 MW) ja Jaapanis (157 MW). Perspektiivsemateks loetakse kõrgetemperatuurilisi grafiit-gaasreaktoreid, milles gaasi temperatuur (CO₂, He, N₂) küünib üle 700—850 °C. Seda tüüpi katsereaktoreid ehitatakse Inglismaal, USA-s ja Saksa FV-s. Sellistel väljuva gaasi temperatuuridel võib aatomielektriijaamades kasutada nii kõrgete auru parameetritega auruturbiine kui ka gaasiturbiine.

Kõrgeid auru parameetreid võib saada ka grafiit-naatriumreaktoritega aatomielektriijaamades ning kiiretel neutronitel töötavate paljundusreaktoritega, kus soojuskandjaks võivad olla vedelmetallid, gaasid või veeaur.

Reas maades (USA, Prantsusmaa, Rootsi, Norra) projekteeri-



Joon. 52. Aatomielektrejaama «Blinkley-Point» reaktorisakond: 1 — reaktori korpus; 2 — toru soojust eraldavate elementidega; 3 — täitemasin; 4 — tühjendusmasin; 5 — kõrgrõhu-aurugeneraatori trummel; 6 — madalrõhu-aurugeneraatori trummel; 7 — kraana; 8 — CO₂ sisselask; 9 — aurugeneraator; 10 — kraana; 11 — gaasiventilaator; 12 — torustik CO₂ andmiseks reaktoris.

takse ja ehitatakse aatomielektriijaamu reaktoritega, kus soojuskandjaks ja aeglustiks on raske vesi (keev või mittekeev). Tšehhoslovakkias ehitatakse NSV Liidu abiga aatomielektriijaama, mille reaktoris võimsusega 150 MW on aeglustiks raske vesi ja soojuskandjaks CO₂. Taolisi elektriijaamu projekteeritakse ka Prantsusmaal ja Saksa FV-s. Paralleelselt suure võimsusega aatomielektriijaamade rajamisega luuakse reas maades statsionaarseid ja transporditavaid väikese võimsusega jaamu.

Nõukogude Liidus on alates 1961. aastast katselises eksploatatsioonis transporditav aatomielektriijaam võimsusega 1500 kW. See on väikese võimsusega aatomielektriijaama prototüüp maa nendele rajoonidele, mis asuvad väljaspool energiasüsteeme. Kogu elektriijaama sisseseade on paigutatud neljale iseliikuvale roomikplatvormile ja teda võib pärast kohaletoimetamist kiiresti tööle lülitada. Vesi-vesireaktori soojusvõimsus on 8,8 MW. Auru parameetrid 20 ata, 280 °C. Seadme töötsükli kestus on esialgu 250 ööpäeva, edaspidi aga 2—3 aastat. Jaama sisseseade mass on 210 t.

Blokkelektriijaam «Arbus» anti eksploatatsiooni 1963. aastal. Tema võimsus on 750 kW ja reaktori soojusvõimsus 5 MW. Neutronite aeglustina ja soojuskandjana kasutatakse orgaanilist vedelikku — hüdrostabiliseeritud gasooli. Vee asendamine orgaanilise vedelikuga annab mitmeid eeliseid. Vesi-vesireaktori korpuses ületab rõhk 100 ata, seevastu orgaanilise vedeliku puhul on ta vaid 5—6 ata. Puudub esimese kontuuri sisseseade korrosioon. Seade koosneb 19 monteeritavast blokist, mis kaaluvad 20 t. Elektriijaama sisseseade üldmass on umbes 360 t.

USA-s on eksploatatsioonis mitu väikese võimsusega (0,3—2 MW) vesi-vesi- ja keevreaktoritega aatomielektriijaama. Mitu sellist jaama on monteeritud praamidele. Inglismaal töötatakse mitmes firmas välja komplektseid väikese võimsusega aatomielektriijaamu, mis on määratud ekspordiks vähearenenud maa-
desse.

Kui jõutakse väikese võimsusega aatomielektriijaamade seeriatootmiseni, langeb nende maksumus ning elektrienergia oma hind osutub tunduvalt madalamaks, võrreldes orgaanilisel kütusel töötavate väikeste elektriijaamadega.

4. AATOMIELEKTRIJAAMADE ARENGUPERSPEKTIIVID

Aastal 1965 oli kogu maailmas 42 aatomielektriijaama kogu võimsusega 4,6 milj. kW, sealhulgas NSVL-s 0,9 milj. kW. Reaktorite tüüpide järgi jagunevad nad järgmiselt: vesijahutusega (vesi-vesi- ja grafiit-vesi-) — 6, keevreaktoritega — 10; grafiitgaasreaktoritega — 17; raskevesireaktoritega — 3, orgaanilise

soojuskandjaga — 1, grafiitnaatriumreaktoriga — 2 ja paljudusreaktoritega kiiretel neutronitel — 3.

Projekteerimise ja ehitamise staadiumis oli veel 42 jaama summaarse võimsusega 11,36 milj. kW. Nende hulka ei ole arvatud aatomielektriijaamad, mille kohta ei ole veel avaldatud andmeid piisavalt täielikus koguses. Neist 42 jaamast on 6 vesi-vesireaktoritega, 10 keevreaktoritega, 18 grafiit-gaas- ja raskevesi-gaasreaktoritega, 7 raskevesireaktoritega ja 1 grafiit-naatriumreaktoritega.

Installeeritud võimsuse 1 kW maksumuse järgi on vesi-vesi² reaktoritega ja keevreaktoritega aatomielektriijaamad ühel tasemel (võimsusel 300—500 MW umbes 150—200 dollarit kW); samuti on enam-vähem võrdne ka elektrienergia omahind (0,4—0,6 tsenti kWh). Grafiit-gaasreaktoritega aatomielektriijaamadel on 1 kW maksumus 200—300 dollarit kW ja elektrienergia omahind 0,5—0,7 tsenti kWh, seega veidi kõrgem. Teiste reaktoritüüpide kohta on seni veel vähe andmeid.

Paljudes maades on avaldatud aatomienergeetika arendamise rahvuslikud programmid aastani 1980 ja veelgi pikema aja peale. NSV Liidus on aatomielektriijaamade võimsus aastaks 1980 mitukümmend milj. kW, USA-s — 75 milj. kW, Inglismaal — 11 milj. kW, Prantsusmaal 5,5 milj. kW, Jaapanis — 8 milj. kW, Indias — 9 milj. kW, Kanadas — 6 milj. kW ja Rootsis — 4 milj. kW. Paljude maade teadlaste hinnangu alusel ei jää juba 1970. a. aatomielektriijaamad ehitusliku maksumuse ja elektrienergia omahinna poolest maha orgaanilisel kütusel töötavatest elektrijaamadest. Edaspidi paranevad nende näitajad veelgi.

Aatomienergeetika edasise arengu tehnilised suunad on eri maades erinevad, ent on ka ühiseid kontseptsioone kõige perspektiivsemate reaktoritüüpide hindamisel. NSV Liidus planeeritakse lähemaks perioodiks aatomielektriijaamade ehitust Novo-Voronezi ja Beloarski tüüpi reaktorite baasil (ühe bloki võimsusega kuni 500—1000 MW) ning samuti suure võimsusega keevreaktorite baasil.

Installeeritud võimsuse 1 kW maksumus on vesi-vesi- ja grafiit-gaasreaktoritega aatomielektriijaamal umbes 500 rbl. 1 kW bloki võimsuse juures 100 MW ja elektrienergia omahind on 1,8 kop. 1 kWh. Bloki võimsuse suurendamisel kuni 500 MW väheneb maksumus kuni 150 rbl/kW ja omahind kuni 0,5 kop/kWh. Praegusel ajal tehakse projekteerimistöid seda tüüpi reaktoritega jaamade loomiseks.

Perspektiivseteks loetakse reaktoreid, milles aeglustiks on raske vesi ja soojuskandjaks CO₂. Sellistes reaktorites toimub loodusliku uraani ümbertöötamine plutooniumiks kõige efektiivsemalt. Soojuskandjana võib kasutada ka orgaanilist vedelikku. Taastootmistegur ulatub sellistes reaktorites väärtuseni 0,7—0,8, samal ajal kui vesi-vesi- ja grafiit-vesireaktorites on ta kõigest

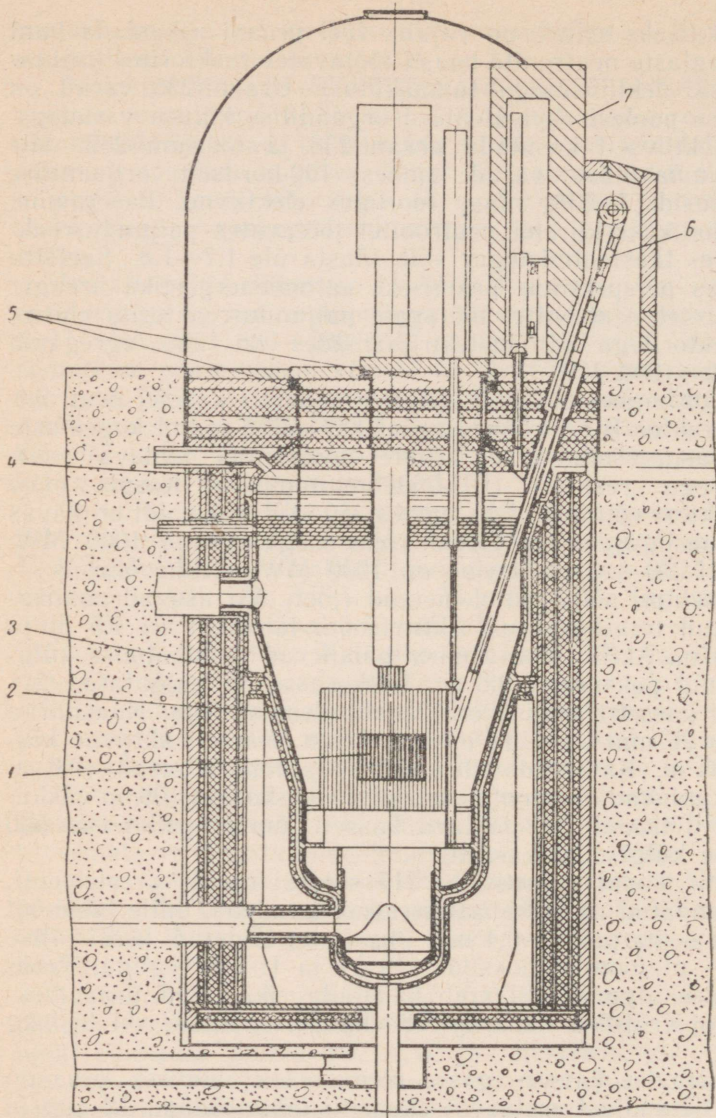
0,3—0,35 ja lisaks sellele on vajalik veel uraani rikastada kuni 1,5—2%. Aeglaste neutronite baasil töötavates reaktorites kasutatakse vähese efektiivsusega tuumakütust. Uraani-235 varud on kütteväärtuse poolest ekvivalentsed orgaanilise kütuse varudega. Kui aga efektiivselt kasutada uraani-238 ja tooriumi-232, siis ületavad tuumakütuse varud umbes 100-kordselt orgaanilise kütuse varusid. U-238 ning tooriumi efektiivne kasutamine osutub võimalikuks kiiretel neutronitel töötavates paljundusreaktorites, milles taastootmistegur võib tõusta üle 1,7—1,8. Seetõttu on kaugemas perspektiivis peamiseks aatomienergeetika arengusuunaks kiiretel neutronitel töötavate paljundusreaktorite ehitus. Selliste reaktoritega aatomienergiaaamades on ühe agregaadiviimsus 500—1000 MW.

NSVL-s on umbes 8 aastat eksploatatsioonis kiiretel neutronitel töötav reaktor БР-5 viimsusega 5000 kW. Saadud kogemuste baasil on vastu võetud otsus kiiretel neutronitel töötava naatriumjahutusega reaktori (БН-350) ehitamiseks Kaspia mere rajooni; reaktori viimsus oleks umbes 350 MW. Edaspidi on kavas ehitada samasuguseid reaktoreid viimsusega 600 ja 1000 MW. Reaktori БН-350 soojusviimsus on 1000 MW, elektriviimsus — 350 MW. Reaktori põhilised elemendid (joon. 53) asuvad naatriumiga täidetud teraskorpuses. Aktiivsooni läbimõõt on 1,5 m ja kõrgus 1,06 m. Aktiivsooni ümber paiknevad taastootmise külge- ja otsatsoonid paksusega 0,6 m. Keskosasse on paigutatud 211 kuusnurkset kasseti soojust eraldavate elementidega. Kuusnurga läbimõõt on 96 mm ja seinapaksus 7 mm. Kasseti aktiivne kõrgus on 2,26 m. Kassetide ülemised ja alumised otsad (0,6 m pikkuses) kuuluvad taastootmistsooni ja keskosa (1,06 m pikkuselt) — aktiivsooni. 211 töötava kasseti ümber paiknevad 500 taastootmise külgtsooni kasseti.

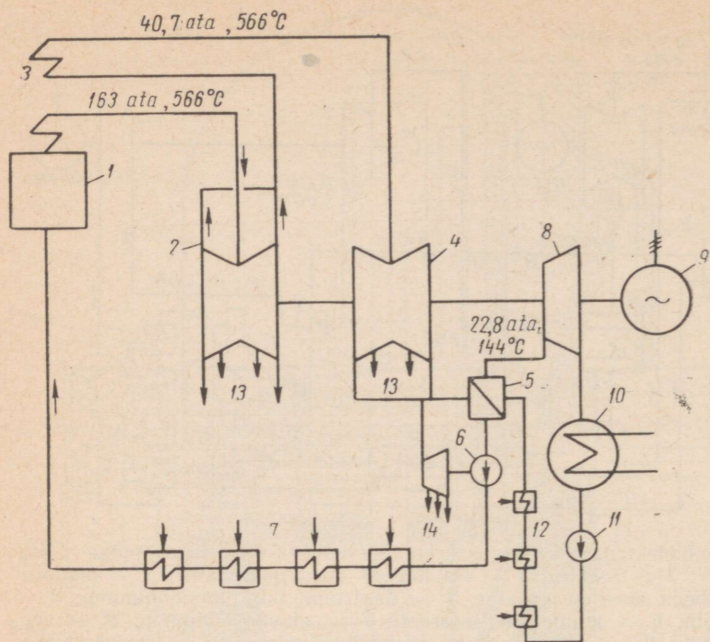
Igas aktiivsooni kassetis on 217 soojust eraldavat elementi, mis on kujundatud roostevabast terasest torudena, mille läbimõõt on 5 mm ja seinapaksus 0,4 mm ja mis on täidetud keraamilise kütusega — plutooniumdioksiidi (19%) ja U-238 seguga. Reaktori töötamise algperioodil võib kasutada rikastatud uraandioksiidi (23%). Kriitiline mass on 780 kg plutooniumi või 950 kg U-235.

211 tsentraalse kasseti igasse ülemisse ja alumisse ossa on paigutatud 37 soojust eraldavat elementi läbimõõduga 12 mm ja seinapaksusega 0,4 mm, mis on täidetud rikastusjäägina saadud uraandioksiidi brikettidega. Igas külgepeegeldi 500 kassetis on 37 soojust eraldavat elementi läbimõõduga 14,2 mm ja seinapaksusega 0,5 mm, mis on samuti täidetud rikastusjäägina saadud uraandioksiidiga.

Naatriumi temperatuur on reaktorisse sisenemisel 300 °C ja väljumisel 500 °C. Tsentrifugaalpump annab reaktorisse 14100 t/h naatriumi rõhul 12 ata. Esimese kontuuri naatriumi



Joon. 53. Kiiretel neutronitel töötav paljundusreaktor BH-350: 1 — aktiivtsoon; 2 — taastootmistsoon; 3 — korpus; 4 — tsentraalkolonn juhtimis- ja kaitsesüsteemide ajamitga; 5 — pöörlev kork; 6 — tühjenuselevaator; 7 — tühjenusboks.



Joon. 55. Elektri jaama soojusskeem ühevõllilise turbiiniga 1000 MW: 1 — katelagregaat; 2 — turbiini kõrgrõhusilinder; 3 — auru vaheülekuumendi; 4 — turbiini keskrõhuaste; 5 — kondensaatoraurusti; 6 — turbokäivitusega kondensaadipump; 7 — kondensaadi eelsoojendid; 8 — freooni auru turbiin; 9 — generaator; 10 — freooni auru kondensaator; 11 — freooni pump; 12 — freooni eelsoojendid; 13 — auru vaheltvõtud kondensaadi soojendamiseks; 14 — auru vaheltvõtud freooni eelsoojenduseks.

Binaarse seadme kasutegur on 48,4%. Elektrienergia omahind 0,3 tšenti kWh. Installeeritud võimsuse 1 kW maksumus ei ole kõrgem kui naatriumi vahekontuuriga seadmel. Elavhõbeda auru kõrgema temperatuuri korral (600—650°C) on võimalik seadme kasutegur viia väärtuseni 50—52%. Sellise seadme projekt võimsusele 1000 MW on praegu väljatöötamisel.

Tavalistes soojuselektri jaamades piirab bloki võimsust katla aurutootlikkus. Praegusel ajal on katelagregaadi maksimaalne võimsus 500 MW. Bloki võimsuse korral üle 500 MW tuleb ühele turbiinile lülitada kaks katelseadet (ehk kaks korpust). Reaktori füüsikalised ja tehnilis-majanduslikud näitajad paranevad tema võimsuse suurenemisel. Tulevikus luuakse reaktoreid elektrilise võimsusega mitu miljonit kW. Ühevõllilise auruturbiini võimsus aga ei ületa praegu 600—800 MW, kahevõllilistel turbiinidel — 1000 MW. Ent juba tänapäeval võib ehitada ühevõllilist turbiini

võimsusega üle 800 MW, kui kasutada madala keemistemperaatuuriga vedelikke. Projekteerimistööd toimuvad selles suunas NSV Liidus, USA-s ja Inglismaal.

Joonisel 55 on toodud Inglismaa Energeetika Keskvalitsuse laboratooriumis väljatöötatud 1000-MW võimsusega ühevõllilise turboagregaadi soojuskeem. Veeaur teeb tööd kõrgrõhu- ja keskrõhusilindrites. Sellise võimsusega tavaline agregaat peaks omama 4—5 kahevoolulist madalrõhusilindrit ja agregaat osutuks vastuvõtmatult pikaks. Nimetatud madalrõhusilindrite asemel on aga kasutatud ainult üht madalrõhusilindrit, milles paisub freoni-21 aur. Enne, kui inglased valisid freoni-21, uuriti läbi 150 mitmesugust vedelikku. See vedelik osutus optimaalseks nii oma termofüüsikaliste omaduste kui ka korrosioonilise passiivsuse poolest. Keskrõhusilindrist väljuv veeaur annab oma soojuse ära soojusvahetis, milles saadakse freoni auru parameetritel 22,8 ata ja 144 °C. Sellise skeemi baasil saab luua ühevõllilist turboagregaati võimsusega 2000 MW. Kui see projekt realiseeritakse, osutub võimalikuks kahevõllilise turboagregaadi loomine võimsusele 4000 MW.

Selliste hiiglaslike turboagregaatide kasutamine koos üli-võimsate reaktoritega võimaldab ehitada aatomielektrijaamu võimsusega 8—12 milj. kW, milles on kaks-kolm blokki reaktor-turbiin.

Tuleviku aatomielektrijaamades leiavad kasutamist ka suletud skeemiga gaasiturbiinid võimsustega 500—1000 MW ning aurugaasiseadmed, millede võimsus küünib üle 1000—1500 MW.

VI peatükk

GEOTERMILISTE, TROOPILISTE, ARKTILISTE, PÄIKESE- JA TUULEELEKTRIAAMADE SISSESEADE

1. GEOTERMILISED ELEKTRIAAMAD

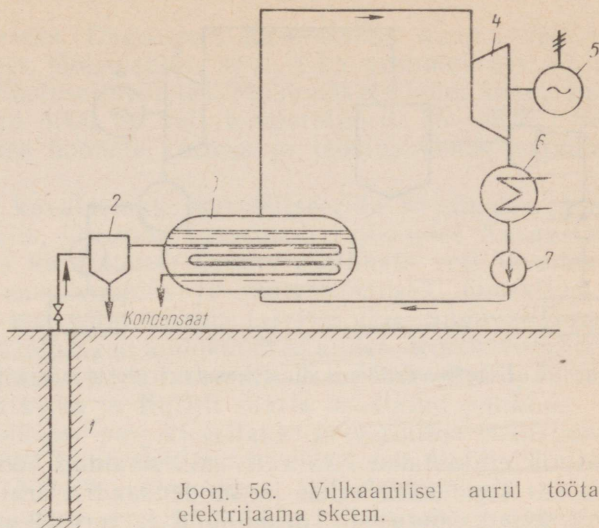
Kaevude puurimisel ja šahtide rajamisel on kindlaks tehtud, et maasse tungimisel pinnase temperatuur tõuseb umbes 3° iga 100 m kohta. Mõnedes maakohtades on see temperatuuri tõus $5-6^{\circ}$.

Maakera, raadiusega 6371 km, koosneb tuumast raadiusega 3470 km, vahevööst paksusega 2900 km ja koorest paksusega 6—80 km. Maa koore aine tihedus on $2,7 \text{ t/m}^3$, vahevöö tihedus $3,3 \text{ t/m}^3$ ja tuuma tihedus $12,5 \text{ t/m}^3$. Vahevöö ülemises osas on rõhk 10—12 tuh. ata. Oletatakse, et rõhk maa keskmises ulatub 3,5 milj. ata-ni. Temperatuur kasvab samuti maa keskmises suunas. Maa koore sisemisel piiril on temperatuur $600-1000^{\circ}\text{C}$ ja maa tsentris $2000-4000^{\circ}\text{C}$. Teatavas sügavuses võib maakera aine olla vedelas olekus.

Maakera sügavustes on salvestatud tohutud soojushulgad («punane süsi»). Arvutused näitavad, et ühe sajandi vältel annab maakera maailmaruumi sellise koguse soojust, mille saaks maakera kõigi orgaanilise kütuse varude põletamisel (kivisüsi, nafta, turvas, puit). Maapõue soojuse (geotermilise energia) kasutamine elektrienergia tootmiseks ja termofikatsiooniks on üheks tähtsaks energeetika arengusuunaks.

Maakera tuuma kõrge temperatuuri säilimise põhjuseks peetakse radioaktiivsete elementide lagunemist. Teise hüpoteesi kohaselt koosnes maa kauges minevikus ainest, mille tihedus oli väga suur ja võrdus või isegi ületas praeguse tuuma keskosa tiheduse. Aja jooksul see aine muundus ja muundub ka praegu vähem tiheks aineks, kusjuures eraldub vesi ja suur kogus soojust.

Reas maades on piirkondi, kus sulanud mass tungib välja maapinnani või on sellele väga lähedal, mis ilmneb vulkaanide pursetena, geiseritena ja kuumaveeallikatena. Kamtšatka kuumaveeallikad eraldavad ööpäeva vältel atmosfääri ligi 300 miljardit kcal soojust, Kamtšatkal ja Kuriili saartel on üle 200 vulkaani,



Joon. 56. Vulkaanilisel aurul töötava elektriijaama skeem.

nende hulgas 60 tegevvolkaani. Suured kõrgetemperatuurilise maa-aluse vee varud leiduvad Kaukaasias, Kesk-Aasias, Siberis, Lääne-Ukrainas ja mujal.

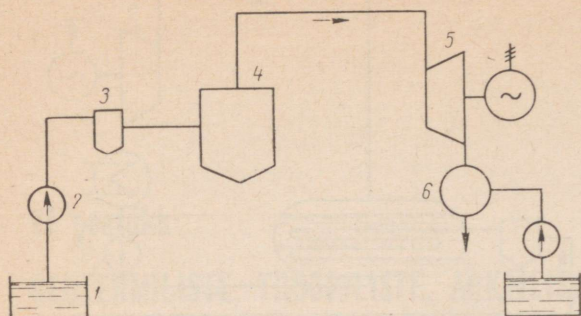
Maa soojust kasutati juba palju sajandeid tagasi. Prantsusmaal on säilinud iidsete Rooma saunade varemed kuumade allikate läheduses. Budapestis varustatakse kuumaveeallikate veega saunu ja vabaõhu-ujumisbasseine. Kantsatkal, Kuriili saartel, Iraagis, Alžiiris ja Uus-Meremaal kasutati keeva vee allikaid toidu valmistamiseks.

NSVL-s, Itaalias ja Uus-Meremaal on kõrge temperatuuri ja rõhuga geotermilised allikad, mis asuvad suhteliselt väikeses sügavuses või ulatuvad välja maapinnale. Sellistes kohtades osutub eriti ökonoomseks maapõue soojuse kasutamine.

Itaalias Larderello lähedal ehitati 1904. a. esimene elektriijaam 40-hj aurumasinaga, milles kasutati vulkaanilist auru. Aastal 1913 paigaldati sinna auruturbiin võimsusega 250 kW ja 1916. a. juba kolm 2500-kW auruturbiini, seejärel aga tõsteti elektriijaama võimsus kuni 12000 kW. Hiljem töötasid selles elektriijaamas kaks turbiini võimsustega ä 300 kW ja neli turbiini võimsustega ä 3500 kW auru parameetritel 4,5 ata, 185 °C.

Teises Larderello elektriijaamas on seitse turbiini võimsustega ä 12 MW. Uue elektriijaama võimsus Larderellos on 274 MW. Selles kasutatakse sügavalt saadud auru 5 ata, 200 °C koguses 3000 t/h.

Üldise ettekujutuse maa-alusel aurul töötava elektriijaama ehitusest annab joonis 56. Puuraugust 1 saabuv aur läbib separaatori 2 ja läheb torustikku mööda kondensaatoraurustisse 3. Sepa-



Joon. 57. Kuumaveeallika soojust kasutava elektrijaama skeem.

raatoris eraldatakse osa vett, mis sisaldab boorhapet. Vulkaaniline aur kondenseeritakse ja kondensaadist eraldatakse boorhappe ning teised saadused. Torukimbud ja torustikud on valmistatud happekindlast materjalidest. Kondensaat antakse pumbaga 7 aurustisse, millest saadud puhas aur suunatakse turbiini 4 (generaatoriga 5) ja seejärel kondenseeritakse kondensaatoris 6. Saadud kondensaat läheb uuesti aurustamisele.

Kuumaveeallikate ja geiserite soojust võib kasutada elektrienergia tootmiseks mitmesuguste skeemide järgi. Kõige lihtsaks skeemiks on madala keemistemperatuuriga vedelikkude (freoonid, etüülkloriid) aurude kasutamine.

Itaalias on Ischia saarele ehitatud eksperimentaalne geotermiline elektrijaam 300-kW turbiiniga, mis kasutab kuumaveeallika soojust. Kuum vesi soojendab soojusvahetis etüülkloriidi, mis aurustub. Selle vedeliku keemistemperatuur on atmosfäärirõhul $12,5^{\circ}\text{C}$. Etüülkloriidi aur rõhul 4–7 ata ja temperatuuril $60\text{--}80^{\circ}\text{C}$ teeb turbiinis tööd ja kondenseerub. Selle elektrijaama teine turbiin võimsusega 500 kW hakkab kasutama madalrõhulist veeauru. Sellise skeemi järgi (joon. 57) töötab Kongos elektrijaam turbiiniga 275 kW. Kuumaveeallika 1 vesi temperatuuril 95°C antakse pumbaga gaasialdisse 3, kus eraldatakse vees lahustunud gaasid. Aurustis 4 muudetakse vesi küllastunud auruks ja seejärel kuumendatakse abikatlast tuleva auruga, mida on eelnevalt kasutatud kondensaatori ežektoris. Edasi teeb aur tööd turbiinis 5 ja kondenseerub kondensaatoris 6. Auru rõhk on enne turbiini umbes 0,3 ata ja turbiini järel umbes 0,05 ata. Turbiin on kolmeastmeline, pöörlemiskiirusega 1500 p/min. Turbiini esimese astme läbimõõt on 530 mm, viimasel astmel — 915 mm. Kondensaatoris paiknevad 1120 toru pikkusega 3,8 m ja välisläbimõõduga 19 mm. Abikatel toodab auru 310 kg/h rõhul 10,5 ata.

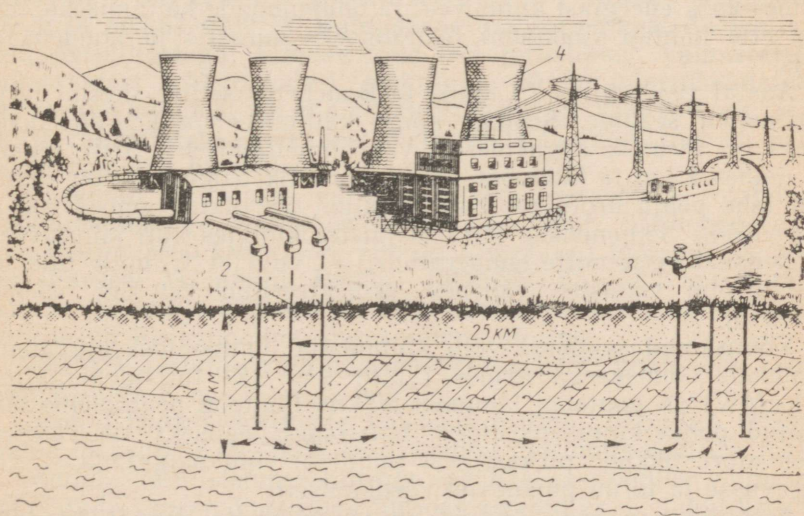
NSV Liidus kasutatakse maa-aluste allikate soojust mõnedes rajoonides elamute kütteks, samuti ka tööstuslikeks ja põllumajan-

duslikeks vajadusteks. Dagestanis kasutatakse kuuma vett elamute kütteks kahes töölisasulas, samuti ka pesumajades, saunades ja mõnedes tööstusettevõtetes. Mahhatškala kolm kaevu annavad ööpäevas kuni 4000 m³ vett temperatuuril 56—68 °C. Seda soojust kasutatakse hoonete kütteks ja tööstuslike vajaduste katteks.

Kuuma veega kavatakse termofitseerida Krasnodar, Armavir, Maikop, Naltšik, Groznõi. Stavropoli rajoonides Kasahstanis ja Omski oblastis kasutatakse kuumaveeallikate vett lavades ja kasvumajades, loomafarmides ja majapidamises. Omskisse on ehitatud basseini, kus võib supelda talvisel ajal. Sügavalt saadavat kuuma vett kasutatakse toidukombinaatides. Kuumaveeallikate veega on ette nähtud termofitseerida Kamtšatka-Petropavlovski ja rea teiste Kamtšatka ja Kuriili saarte asustatud punktid.

Lõuna-Kamtšatkasse projekteeritakse geotermilist elektrijaama võimsusega 12 MW. Teine elektrijaama ehitatakse Mahhatškalasse. Töötatakse välja 500-kW võimsusega tüüpelektrijaama projekti kasutamiseks meie maa eri piirkondades. Elektrienergia omahind osutub geotermilistes elektrijaamades madalamaks kui hüdroelektrijaamades.

Uus-Meremaal ehitatakse geotermilist elektrijaama võimsusega 40 MW, mida edaspidi suurendatakse 250 MW-ni. Selliste elektrijaamade ehitamist planeeritakse Islandil, mille pealinna



Joon. 58. Elektrijaama skeem auru saamisega sügavamatest puuraukudest: 1 — pumbajaam; 2 — vee sisselaske-puurauk; 3 — auru väljajuhtimis-puurauk; 4 — elektrijaama peahoone ja gradiirid.

Reykjavikki köetakse juba ammu geotermilise veega. Samuti planeeritakse nende ehitamist USA-s, Jaapanis ja teistes maades. Islandi ja Jaapani esimeste geotermiliste elektrijaamade projekteeritud võimsus on 3000 kW.

Peetakse võimalikuks rajada geotermilisi elektrijaamu võimsusega kuni 10 milj. kW joonisel 58 näidatud skeemi järgi. Vesi antakse puurkaevudega 4—10 km sügavusse, kus ta aurustub ja aur juhatakse turbiinidesse.

On väljaspool kahtlust, et suure võimsusega geotermilised elektrijaamad levivad tulevikus väga laialdaselt.

2. TROOPILISED ELEKTRIAAMAD

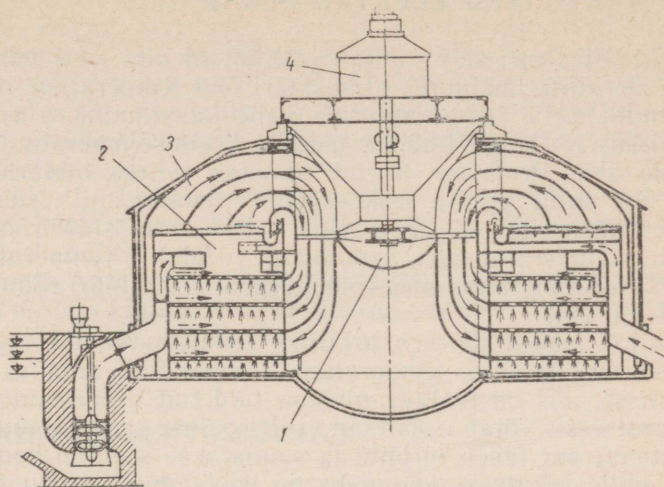
Troopilistes meredes on ülemiste veekihtide temperatuur 25—35 °C, kusjuures sügavamate veekihtide temperatuur ei ületa 8 °C ja 1000 m sügavuses 4—5 °C. Kui vett temperatuuril 28—30 °C anda pumbaga aurustisse, mis töötab sellel temperatuuril vastaval keemisorohul, siis võib aurustis saada auru rõhul 0,03—0,04 ata. Saadud aur võib paisuda turbiinis rõhuni umbes 0,015 ata, kondenseerudes segamiskondensaatoris temperatuuril 6—8 °C.

Sellise troopiliste merede soojuse kasutamise skeemi realiseerisid aastal 1928 professor Claude ja insener Boucherot. Nende 25-kW võimsusega katseseadme mehaaniline kasutegur oli 75%. Umbes 25% energiast kulus vee- ja õhupumpade käitamiseks, mis olid ette nähtud vaakuumi tekitamiseks aurustis ja kondensaatoris.

Aastal 1930 ehtasid Claude ja Boucherot sellise skeemi järgi tööstusliku seadme. Seadme kõige kallimaks ja keerulisemaks osaks oli torustik sügavmerest vee ammutamiseks. Selle pikkus oli umbes 2 km ja läbimõõt 1,6 m. Torustik paiknes kaldu vastavalt lahe põhja profiilile. Toru alumine ots ulatus umbes 600 m sügavusele. Soojenemise tõttu ülemistes kihtides anti jahutusvesi kondensaatorisse mitte temperatuuril 8°, vaid 14 °C, mille tulemusel turbiini võimsus vähenes projekteeritud 50 kW asemel 25 kW-ni.

Võimsamad seadmed võib kujundada pontoonidel ujuvatena. Seadmele võimsusega umbes 1 milj. kW (24 turbogeneraatorit à 40 MW) on pontooni läbimõõt 600 m. Pontoon peab olema kinnitatud põhja kinnisankrutega. Ujuvjaama eeliseks on väiksem imemistorustikkude pikkus, sest pontooni võib paigutada suurde sügavusse ja torud paiknevad vertikaalselt.

Troopiliste merede soojust on võimalik rakendada ka teise skeemi kohaselt — madalat keemistemperatuuri omavate vedelikude kasutamiseks. Sel juhul on aurul kõrge rõhk, mis võimaldab vähendada turbiini mõõtmeid ja maksumust.



Joon. 59. Troopikaelektrijaama turbogeneraator võimsusega 3500 kW: 1 — auruturbiin; 2 — kondensaator; 3 — aurusti; 4 — generaator.

Abadianis (Lääne-Aafrika) ehitatakse troopilist elektrijaama võimsusega 7000 kW. Sellisele turbiinile on vaja umbes 30 000 m³/h sügavvett temperatuuriga 8 °C. Torustiku läbimõõt on 2,5 m ja pikkus 4000 m. Kaldaäärne osa torustikust on lehtterasest, äärikliidetega. Kolmveerand osa torustikust valmistatakse painduvatest sektsioonidest pikkusega 50 m, mis ühendatakse armeeritud kummist 2,6 m pikkuste hülssidega. Viimane osa torustikust valmistatakse jäikadest metallsektsioonidest, mis on ühendatud kummist hülssidega.

Vaakuum tekitatakse aurustis ja kondensaatoris rotatsioonvaakuumpumbaga, millel on kõrge kasutegur. Turbogeneraator võimsusega 3500 kW (joon. 59) on arvestatud töötamiseks pöörlemiskiirusel 332 p/min. Rootori läbimõõt on 14,2 m. Turbiini korpus (läbimõõt 37,2 m) on valmistatud armeeritud betoonist. Turbiin on üheastmeline, jugakondensaatoriga.

7000-kW turbiinil võib pöörlemiskiirusel 600 p/min olla rootor läbimõõduga 8 m.

Prof. Claude'i arvutuste kohaselt osutub troopilise elektrijaama maksumus 40—50% madalamaks kui hüdroelektrijaamal.

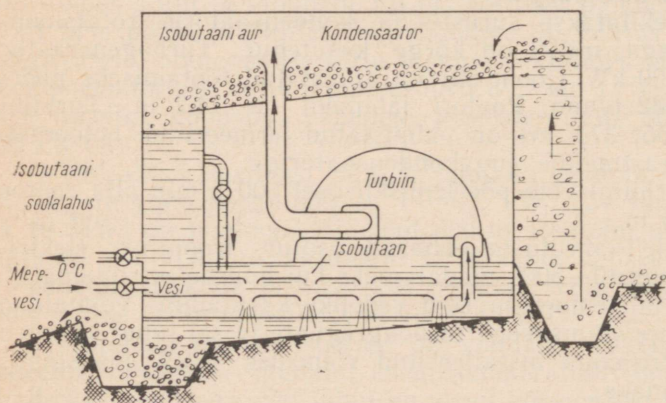
Madala keemistemperatuuriga vedelike kasutamine võimaldab valmistada suure võimsusega turboagregaatide ja sel juhul kujuneb troopilise elektrijaama installeeritud võimsuse 1 kW maksumus veelgi madalamaks.

3. ARKTIKILISED ELEKTRIJAMAD

Arktilistes meredes säilitab jääkihi all olev vesi temperatuuri $2-3^{\circ}$ üle nulli, kusjuures atmosfääri õhu temperatuur on $20-40^{\circ}$ alla nulli. Selle temperatuuride vahe kasutamine elektrienergia tootmiseks on kõige lihtsam madala keemistemperatuuriga vedelike abil. Professor Barjot soovitas selleks otstarbeks kasutada üht nafta utmise fraktsiooni — isobutaani. Isobutaan on süsivesinik keemistemperatuuriga -10°C atmosfäärirõhul. Madalamatel temperatuuridel isobutaan veeldub. Temperatuuril üle -10°C on isobutaani auru rõhk kõrgem atmosfääri rõhust ($+2^{\circ}\text{C}$ puhul 1,1 ata).

Barjot' tsüklil töötava arktilise elektrijaama skeem on antud joonisel 60. Merevesi temperatuuril umbes 0°C antakse pumbaga aurustisse, mis on teatava nivooni täidetud isobutaaniga. Aurustuse protsessis võtab isobutaan veelt soojuse ja vesi muutub jääks. Isobutaani aur läheb turbiini ja suunatakse seejärel kondensaatorisse, mille jahutuskeskkonnaks on soolalahus külmumistemperatuuriga -22°C , mis on lahtises basseinis külmutatud atmosfääriõhuga. Isobutaani aurud puutuvad kondensaatoris kokku soolase jääga, veeldudes seejuures, millega kaasneb ka osaline jää sulamine.

Selles skeemis on kasutatud isobutaani sellepärast, et ta ei segune veega. Selles põhineb ka isobutaani eraldamine soolalahusest kondensaatoris. Isobutaan oma väikese erikaalu tõttu tõuseb kondensaatorikogujas pinnale ja juhitakse aurustisse. Suurema erikaaluga soolalahus juhitakse välja koguja alumisest osast ja läheb jahutamiseks basseini.



Joon. 60. Arktikaelektrijaama skeem.

Jahutuslahuse temperatuuril alla -22°C on seadme kasutegur umbes 8%. Barjot' arvutuste kohaselt võib installeeritud võimsuse 1 kW maksumus olla arktilises elektrijaamas 5—8 korda madalam hüdroelektrijaama maksumusest. Detailseid arktiliste elektrijaamade ja nende sisseseade projekte pole käesoleva ajani tehtud ja toodud arvude tõepärasust seadme maksumuse osas pole praktiliselt tõestatud.

Võimalik, et arktiliste elektrijaamade loomiseks tehtavate tööde jätkamisel kasutatakse teisi soojuskeeme ja isobutaani asemel teisi soojuskandjaid.

Arktika ja Antarktika rajoonides luuakse kahtlemata elektrijaamad, mis ei vaja kütust, vaid kasutavad ookeani vee ja atmosfääri õhu temperatuuride vahet.

4. PÄIKESEELEKTRIJAAAMAD

Maa atmosfääri ülemised kihid saavad päikeseenergiat koguses umbes $1200 \text{ kcal/m}^2\text{h}$. Seda suurust nimetatakse päikesekonstandiks S .

Maa pind võib saada Päikese energiat

$$Q = S\varphi,$$

kus φ on tegur, mis väljendab päikesekiirguse nõrgenemist Maa atmosfääris.

Päikeseelektrijaamas võib kasutada päikeseenergiat koguses

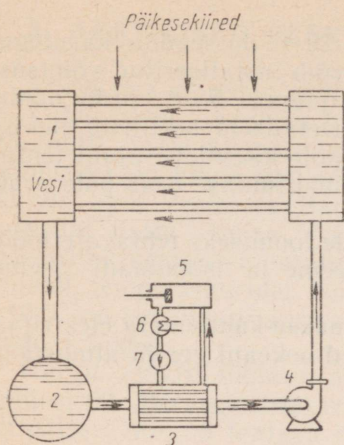
$$Q_e = Q\eta_e,$$

kus η_e on Päikese kiiri püüdva seadme kasutegur.

Professor B. P. Veinbergi arvutuste kohaselt võiks päikesekiirguse soojuse kasutamine ühel kümnendikul NSV Liidu territooriumist anda võimsust umbes 15 miljardit kW. Arusaadav, et kõige kasulikum on päikeseenergiat elektrienergiaks muuta meie maa lõunarajoonides. NSV Liidu lõunarajoonis võib päikeseelektrijaami kiirguse vastuvõtjate pindalaga 1 km^2 olla B. P. Veinbergi arvutuste kohaselt võimsusega 40 MW. Kui täis ehitada päikeseenergia vastuvõtjaid 3% Kesk-Aasia vabariikide territooriumist, siis võib saada võimsust umbes 700 milj. kW. See ületab kahekordselt NSV Liidu jõgede potentsiaalse võimsuse.

Tänapäeval ei ole veel loodud nimetamisväärse võimsusega tööstuslikke päikeseelektrijaamu, ent lähemas tulevikus leiavad nad meie maa lõunarajoonides kahtlemata kasutamist.

Majapidamise otstarbeks kasutatakse päikeseenergiat (vee soojendamise, toidu keetmine) väikese võimsusega seadmetes. Päikeseenergiat kontsentreeritakse peegelreflektoritega, mis peegeldavad päikesekiiri suurelt pinnalt ja koondavad neid suhteliselt väikesesse fookusesse, kus asuvad seadme soojust vastuvõtavad



Joon. 61. Vahesoojuskandjaga päikesekatla skeem: 1 — veesoojendi torudesüsteem; 2 — kuumaveereservuaar; 3 — kergelt keeva vedeliku aurusti; 4 — tsirkulatsioonipump; 5 — aurumasin; 6 — kondensaator; 7 — kondensaadipump.

elemendid. Selliseks elemendiks võib olla aurukatel, mille auru kasutatakse turbiinis. Täskendis on ehitatud päikeseenergia seade aurutootlikkusega 50 kg/h reflektori läbimõõduga 10 m. Viimane suunatakse päikese poole spetsiaalse mehhanismi abil.

B. P. Veinbergi andmetel on 10 000-kW päikeseelektrijaamale sellisel kujul, nagu teda võib realiseerida tänapäeval, vaja pinda umbes 26 ha. Peetakse silmas, et päikesekiirguse vastuvõtjatena kasutatakse pööratavaid parabolseid peegleid. Nendelt peegelduvad päikesekiired neelduvad katla mustaks värvitud küttepinnales, milles toimub vee aurustamine. Teiselt peeglite süsteemilt suunatakse kiired auru ülekuumendisse, milles toimub auruturbiini mineva küllastunud auru ülekuumendamine. Loodetakse, et sellise päikeseelektrijaama installeeritud võimsuse 1 kW maksumus kujuneb kaks korda väiksemaks tavalise, kivisöe küttel töötava auruturbiinidega elektrijaama maksumusest.

Tänapäeval ekspluateeritakse Itaalias sellist tüüpi katselist päikeseelektrijaama auruturbiini võimsusega 200 kW. NSV Liidus (Armeenias) ehitatakse päikeseelektrijaama võimsusega 1200 kW.

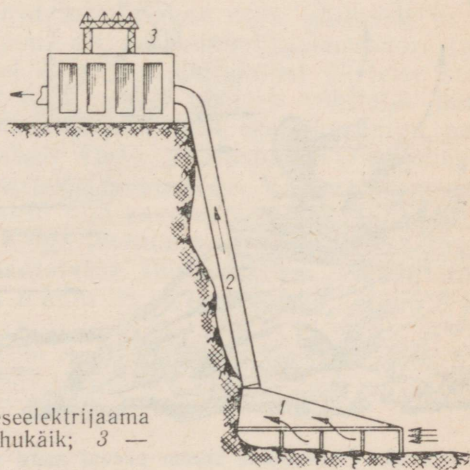
Kuna päikesekiirgust saab kasutada ainult päeval, siis peab päikeseelektrijaam olema lülitatud üldisesse energiasüsteemi koos soojus- ja hüdroelektrijaamadega. Päikesepeaisteperioodil hoitakse sel teel kokku kütust soojuselektrijaamades ja kogutud vett hüdrojaamades.

Päikesekiirte abil võib lagundada vett vesinikuks ja hapnikuks (näiteks tseesiumühendi vesilahuse abil). Päikeseelektrijaamas, mis ei ole lülitatud energiasüsteemi, võib öhtu- ja öötundidel põletada vesinikku aurukatla koldes ja auru kasutada samas turbiinis, mis päeval töötab päikeseenergia arvel.

Kirjeldatud katelseadmetega päikeseenergia seadmete puudu-

seks on nende keerukus ja madal kasutegur väikese temperatuurivahe tõttu. Päikesekatelde tehnilisi näitajaid saab parandada, kui vesi asendada teiste vedelikega. Ühe sellise seadme skeem on kujutatud joonisel 61. Päikesekiired juhitakse peeglite süsteemi abil torudest valmistatud küttepinnale, kus nad neelduvad. Soojuse võtab vastu vesi, mis antakse küttepinnale pumbaga 4 reservuaarist 2. Kuumutatud vesi suundub uuesti tagasi reservuaari. Teel reservuaarist 2 pumbani 4 läbib vesi aurusti 3 torud, millede vahel on madala keemistemperatuuriga vedelik (näiteks SO_2). Vesi annab ära osa oma soojusest selle vedeliku aurustamiseks. Vee temperatuuril 80°C saadakse SO_2 aur rõhul 17 ata, mis teeb tööd elektrigeneraatorit käitavas aurumasinas. Töötanud aur läheb kondensaatorisse 6 ja kondensaat suunatakse pumbaga 7 tagasi katlasse 3 aurustamiseks. Masina võimsuse 1 hj kohta on vaja umbes 9 m^2 soojust neelavat pinda.

Suurt huvi pakuvad tulevikus suure võimsusega päikeseelektrijaamad. Joonisel 62 on toodud ühe sellise elektrijaama võimalik skeem. Elektrijaama hoone paikneb mäe tipus või nõlvakul ja on seadmestatud õhuturbiinidega elektrigeneraatori käitamiseks. Õhu temperatuur ja rõhk on 500–1000 m kõrgusel tunduvalt väiksemad kui maapinnal. Kui maapinnale paigutada suure pindalaga klaaskatus, siis õhk katuse all kuumeneb ja tõuseb toru kaudu üles samuti, nagu see toimub korstnas. Õhu temperatuuride ja rõhkude vahe toru aluse ja tipu vahel tekitab õhuvoolu kiirusega 100–200 m/s. Selline õhu kiirus võimaldab ehitada õhuturbiine võimsusega üle 50–100 MW. Seda tüüpi elektrijaama kalliks osaks on suure läbimõõdu ja pikkusega soojuslikult isoleeritud toru. NSV Liidus võiksid sellised seadmed leida kasutamist Kaukaasias ja Kesk-Aasia mägirajoonides.



Joon. 62. Õhuturbiiniga päikeseelektrijaama skeem: 1 — klaaskatus; 2 — õhukäik; 3 — elektrijaama masinasaal.

Päikesekiirguse muundamine elektrienergiaks on võimalik ka termoelektrigeneraatorite ja fotoelementide baasil. Selliseid elektrigeneraatoreid luuakse mitmetes maades, ent nende võimsus on piiratud ja senini pole selgunud nende tehnilise kasutamise võimalused suure võimsusega päikeseelektrijaamades.

5. TUULEELEKTRIJAAAMAD

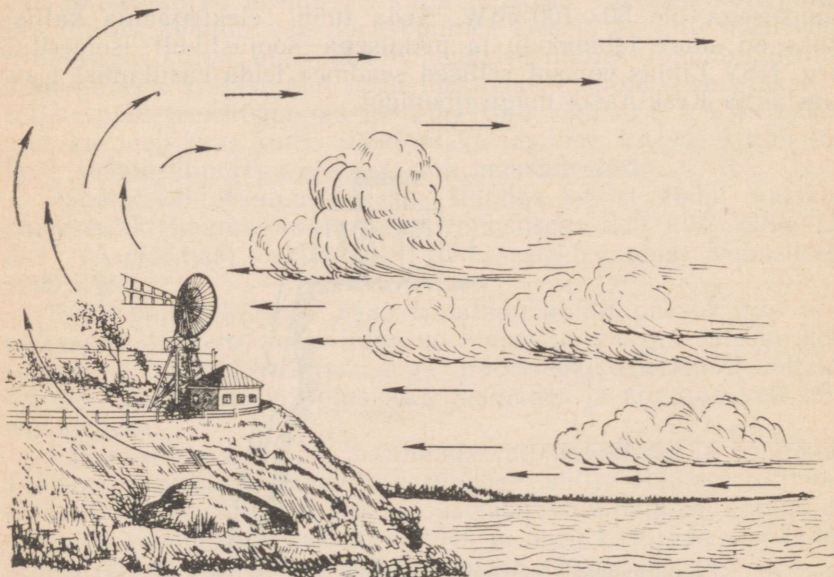
Ohuvoolud ehk tuuled tekivad päikesekiirguse toimel maapinna ebahõltselise soojenemise tagajärjel. Päeval soojeneb maa rohkem kui meri. Soojenenud õhk tõuseb üles ja merelt voolab jahedamat õhku juurde. Öhtul jahtub maa kiiremini kui meri. Seetõttu tõuseb mere kohal õhk üles ja jahedam õhk hakkab voolama maalt merele. Selliseid tuuli (joon. 63) nimetatakse briisideks.

Maakeral on mitu riba iseloomulike tuulte suuna ja tugevusega.

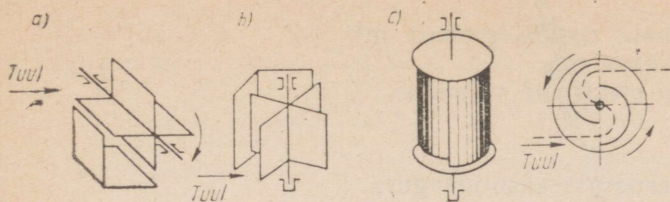
1. Ekvaatori tsoon: soojenenud õhk tõuseb üles ja suundub pooluste poole; see on vaikuse tsoon, kus tuuled puuduvad.

2. Tsoon, mis asub troopilisest ribast põhja ja lõuna pool. Nende ribade õhk suundub ekvaatori poole ja põhjustab tuuli, mida nimetatakse passaatideks. Need tuuled paistavad silma oma püsiva suuna ja tugevusega.

3. Keskmiised laiused ja polaaralad; nendes tsoonides on



Joon. 63. Ohuvoolude skeem päeval mere rannikul (briis).



Joon. 64. Lihtsaimate tuulemootorite skeemid: a — trummeltüüpi; b — karusselltüüpi; c — rootormootor (kahest poolsilindrist).

tuuled muutlikud nii suuna kui ka tugevuse poolest, sest kohalik maapinna reljeef, temperatuurid ja teised tegurid moonutavad ja häirivad õhumasside korrapärast voolamist, nagu see esineb troopilistes vööndites.

Tuuleenergia («sinise söe») varud ületavad maakeral 3—4 kordselt olemasolevate elektrijaamade võimsuse ja üle kahe korra hüdroenergia («valge söe») varusid. Jõgede potentsiaalne võimsus on keskmiselt 3—5 hj 1 km² maapinna kohta. Tuule potentsiaalne võimsus on meie maa territooriumil umbes 20 kW 1 km² kohta.

Tuuleenergiat kasutatakse juba mitme tuhande aasta vältel. Umbes 3000 aastat tagasi hakati ehitama tuuleveskeid Egiptuses ja seejärel Hiinas. Babülooonias kasutati neid soostunud alade-kuivatamisel. Euroopas hakati kasutama tuulemootoreid VIII sajandil pumpade käitamiseks ja nad olid eriti laialt levinud Hollandis vee väljapumpamiseks merepinnast madalamatelt aladelt. Venemaal kasutati tuuleveskeid laialdaselt vilja jahvatamiseks. Veel aastal 1913 oli Venemaal umbes 250 tuhat sellist veskit üldvõimsusega 1,4 milj. kW.

Lihtsaimad tuulemootorid meenutavad oma ehituselt ja tööprintsibiilt vesiratast (joon. 64). Trummel-tuulemootor (joon. 64, a) on tuuleratas, millel on neli riskülikulist üksteise suhtes täisnurga alla paigutatud laba ja mis pöörleb rõhttelje ümber. Kui sellise ratta alumist poolt varjata tuule eest ekraaniga, paneb tuule surve ülemisele labale ratta pöörlema. Karussellmootor (joon. 64, b) on vertikaalse pöörlemisteljega. Väikese võimsusega trummel- ja karussellmootorid olid kasutusel vanas Hiinas püsiva tuulesuunaga tasandikel. Kõige levinumaks tuulemootori tüübiks on tiivikmootor, mida kasutatakse tuuleveskites. Nende tuulerataste läbimõõt on alates 8 kuni 25 m ja võimsus kõigub 5 kuni 25 hj.

Tuule teoreetiline võimsus P_t sõltub tema kiirusest ω :

$$P_t = \frac{\rho F \omega^3}{2 \cdot 75} \text{ hj,}$$

kus ρ on õhu tihedus kg·s²/m⁴;

F — õhuvoolu ristlõikepindala m^2 ;

w — õhu kiirus m/s .

Tuulemootori efektiivne võimsus

$$P = P_t \eta \eta_m,$$

kus η on tuuleenergia kasutustegur;

η_m — tuulemootori mehaaniline kasutegur.

Tuule kiirus muutub ööpäeva ja sessiooni vältel laiaades piirides; Nõukogude Liidu keskmistel laiustel 200—500 m kõrgusel ta tavaliselt ei ületa 8—9 m/s , Kuriili saarte rajoonis küünib aga talvel 5000 m kõrgusel kuni 75 m/s .

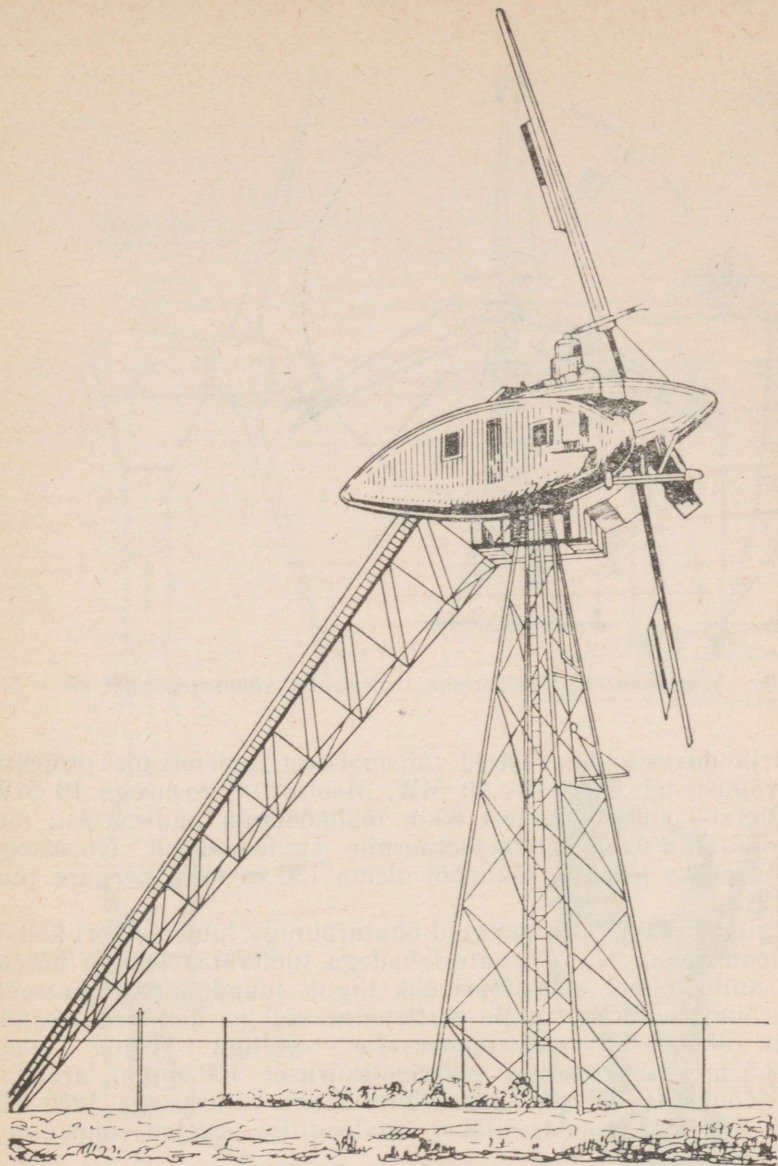
Tuulemootor projekteeritakse nii, et ta arendaks täisvõimsust sellel tuule kiirusel, mis vastab antud koha aasta keskmisele. Arvutuslikul tuule kiirusel 20 m/s (75 km/h) võib tuulemootor põhjalaiustel töötada täisvõimsusel 3000—4500 tundi aastas. Et toodetava elektrienergia omahind oleks küllalt väike, peab mootor täisvõimsusel töötama vähemalt 2500 tundi aastas. Tunduval osal NSV Liidu territooriumist puhuvad tuuled keskmise kiirusega mitte üle 4—5 m/s . Selle kiiruse puhul võib igalt ruutkilomeetrilt saada aasta jooksul keskmist võimsust 250—750 kW . Kogu NSV Liidu territooriumi kohta teeb see välja 10 miljardit kW .

Kaasaegse tuulemootori normaalseks võimsuseks loetakse võimsust tuule kiirusel 8 m/s . Mingi maksimaalse tuule kiiruse juures, mis kujuneb ohtlikuks konstruktsioonile, lülitatakse mootor välja (labad pööratakse paralleelseks õhuvoolule).

N. E. Zukovski tõestas, et tuuleenergia kasutustegur on ideaalsel tuulemootoril 59,3%. Tuuleveskitel võrdub ta 8—10%, rootor-mootoritel 6—23% ja parimatel tuulemootoritel 42%. Selle teguri keskmine suurus on tehases seeriaviisiliselt toodetavatel tuulemootoritel 30—35%. Kaasaegsete tuulemootorite mehaaniline kasutegur on 80—90%.

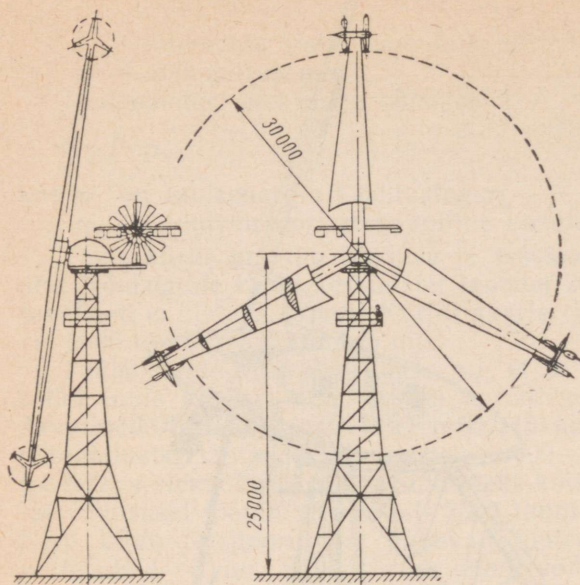
NSV Liidus on loodud tuulemootorite konstruktsioonid võimsusega 1 kuni 1000 kW . Krimmis monteeritud tuulemootor ЦАГИ (joon. 65) arendab võimsust 22—177 hj tuuleratta läbimõõdu juures 30 m ja tuule kiirusel 5—10 m/s . Selle seadme elektrigeneraator on paigutatud suletud gondlisse.

N. V. Krassovski esitas aerodünaamilise ülekandega tuulemootori skeemi (joon. 66). Peatuuleratta labade otstes on sekundaarsed tuulerattad, mis töötavad suure suhtelise kiirusega — 40—70 m/s — õhuvoolus. See võimaldab tõsta pöörlemiskiirust üle 500 p/min mehaanilise kasuteguri juures 80% ja rohkem. Pöördemoment kantakse üle sekundaarsetelt tuuleratastelt tuulemootori peasse paigutatud elektrigeneraatorile peente võllide abil, mis paiknevad peatuuleratta labade sees. Peatuuleratta läbimõõdu juures 80 m ja sekundaarsete tuulerataste läbimõõdul 5—7 m on elektrigeneraatori võimsus 4500 kW , kui aasta keskmine tuule



Joon. 65. Tuulemootor.

kiirus on 9 m/s. Selline tuulemootor võib aastas anda umbes 11 milj. kWh elektrienergiat. Peatuuleratta läbimõõdul 30 m ja sekundaarsete tuulerataste läbimõõdul 2–5 m oleks elektrigeneraatori võimsus 150 kW aasta keskmisel tuule kiirusel 6 m/s.

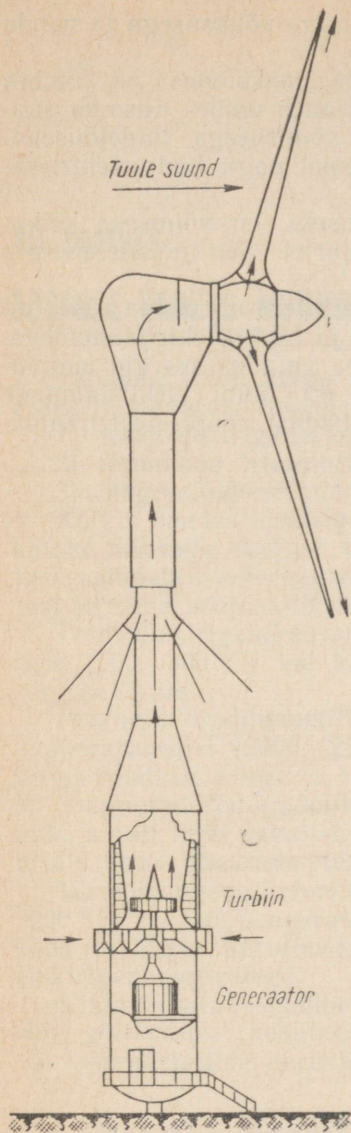


Joon. 66. Aerodünaamilise ülekandega tuulemootor võimsusega 150 kW.

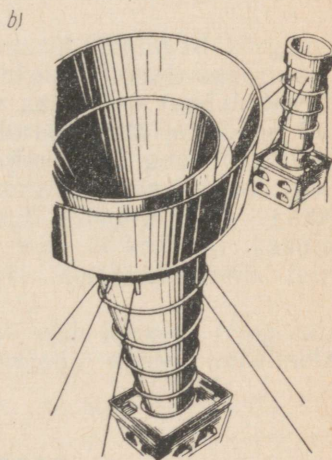
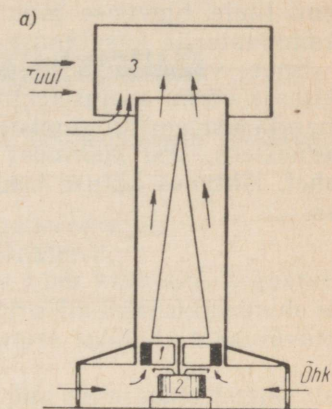
Kirjanduses leidub teateid välismaistest tuulemootori projektidest võimsustele kuni 10–20 MW. Mootorit võimsusega 10 MW on võimalik ehitada kahest 80-m läbimõõduga tuulerattast, mis on paigutatud ühele raudbetoon tornile. Tuulemootoril võimsusega 20 MW peaks töörotta läbimõõt olema 130 m torni kõrguse juures 250 m.

Inglismaal on välja töötatud õhuribiiniga tuulemootori konstruktsioon (joon. 67). Õõnsate labadega tuuleratas tekitab hõõrduse, mille toimel atmosfääri õhk liigub suundaparaati ja sealt õhuribiini rootoris, mille vertikaalne võll on hammasülekande kaudu ühendatud elektrigeneraatori võlliga. Tuule kiirusel 13,5 m/s ja propelleri pöörlemiskiirusel 100 p/min arendab seade võimsust 100 kW. Seda tüüpi seade võimsusega 1250 kW töötab USA-s. Projekteeritakse analoogilist seadet võimsusega 7500 kW.

Joonisel 68 on kujutatud õhuribiiniga tuulejõuseadme teine variant. Tornis alumises osas paikneb õhuribiin 1, mille võll on hammasülekande kaudu või otse ühendatud elektrigeneraatori 2 võlliga. Tornis ülemise osa kohale on paigutatud kontsentriselt suure läbimõõduga silinder 3. Selle ümber suures kõrguses voolates tungivad õhuvoolud rõngakujulisse ruumi silindri ja torni vahel. See kutsub esile õhu väljajaimemise (ežektsiooni) tornist. Ežektor tekitab tornis suure kiirusega õhu voolu, mis käitab tur-



Joon. 67. Õhuturbiinseade hõrendust tekitava tuulerattaga.



Joon. 68. Õhuturbiinseade tuuležektoriga: a — skeem; b — väliskuju.

biini. Seda tüüpi seadmed võivad olla suure võimsusega ja nende töö ei sõltu tuule suunast.

Väikese võimsusega tuulemootorite maksumus on umbes 150 rbl/kW. Elektrienergia omahind kujuneb umbes niisama suureks kui hüdroelektrijaamades. Suure võimsusega tuulejõuseadmete ökonoomsus võib olla samal tasemel nagu hüdroelektrijaamadel.

Autonoomsete tuulemootorite puuduseks on võimsuse kõikumine tuule tugevuse muutumise tagajärjel. See nõuab energia akumulaatorite kasutamist.

Suure võimsusega tuuleelektrijaamad peavad olema lülitatud ühisesse võrku soojuselektrijaamadega ja hüdroelektrijaamadega. Energiasüsteemi tingimustes langeb ära vajadus energia akumuleerimiseks, sest koormust jaotatakse eri tüüpi elektrijaamade vahel, lähtudes kütuse kokkuhoiu printsiibist soojuselektrijaamades.

SOOJUSE VAHETU MUUNDAMINE ELEKTRIENERGIAKS

Tänapäeval on kõige levinumateks soojusenergia elektrienergiaks muundajate tüüpideks:

- 1) termoelektrigeneraatorid;
- 2) termoioon- (termoemissioon-) generaatorid;
- 3) magnethüdrodünaamilised generaatorid.

Kõigis nendes elektrigeneraatorites võib kasutada orgaanilise kütuse põlemise soojust, tuuma- ja termotuumareaktsioonide soojust, radioaktiivsete isotoopide lagunemise soojust, maa süvasoojust ja muid soojusallikaid.

Termoelektrigeneraatorites kasutatakse nii madala temperatuuriga (200—300 °C) kui ka kõrge temperatuuriga (400—700 °C) soojusallikaid.

Magnethüdrodünaamilised generaatorid töötavad kõrgematel temperatuuridel (2000—2500 °C ja rohkem). Lõpptemperatuur on selles seadmes kõrge ja ringprotsessi kasutegur madal. Seetõttu on magnethüdrodünaamilisi generaatoreid otstarbekohane kasutada ainult koos tavaliste aurujõuseadmetega, gaasiturbiinidega ja auru-gaasijõuseadmetega või siis termoelektrigeneraatoriga.

Termoioongeneraatoritel on samuti kõrged alg- (1000—2000 °C) ja lõpptemperatuurid. Neid võib efektiivselt kasutada koos tavaliste aurujõuseadmetega või kombinatsioonis termoelektrigeneraatoritega.

Ülalnimetatud seadmete skeemides võib kõrgete temperatuuride piirkonnas kasutada soojuskandjana gaase, vedelmetalle või vedelmetallide aurusid.

1. TERMOELEKTRIGENERAATORID

Soojuse vahetuks muundamiseks elektrienergiaks kasutatav termoelektriline element kujutab endast kahest erinevast materjalist kinnist elektriahelat.

Selle ahela ühe kontakti (kuumjootekoha) kuumutamisel ja teise kontakti (külmjootekoha) jahutamisel tekib ahelas elektrivool. Sellise ahela kontakti kuumutamisel kaasneva elektrivoolu

tekkimise avastas Zeebeck 1822. a., vaadeldes ahela lähedusse paigutatud magnetnõela kõrvalekaldumist.

Zeebecki vaatlused näitasid, et magnetnõela hälve oli seda suurem, mida suurem oli temperatuurivahe kahest materjalist ahela kontaktide vahel:

$$E = \alpha(T_1 - T_2),$$

kus E on elektriliste potentsiaalide vahe (elektromotoorjõud);

$T_1 - T_2$ — kontaktide temperatuuride vahe;

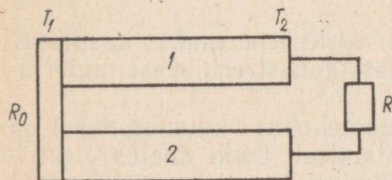
α — Zeebecki tegur ehk termoelektrilise jõu tegur.

Termoelementidest järjestikku ja rööbiti koostatud patareid, mis annavad vajalikku voolu ja pinget, nimetatakse termoelektrigeneraatoriks. Termoelektrigeneraatoril puuduvad igasugused liikuvad osad.

Esimesed elektrivoolu saamiseks ettenähtud termoelektrigeneraatorid valmistati metallidest. Metallist termoelementide pinge on madal (10^{-5} V/deg) ja kasutegur ei ületa 0,5—1%.

Aastal 1929 soovitas A. F. Joffe kasutada termoelementide elektrodidena pooljuhte. Need annavad pinget 10^{-3} V/deg, see tähendab 100 korda rohkem kui elektrijuhid. Pooljuht-termoelementide kasutegur on tänapäeval kuni 10—12%.

Vabade elektronide kineetiline energia metallides peaaegu ei sõltu temperatuurist. Temperatuurivahe metallist juhi otstes kutsub esile nõrga laengute liikumise ja elektripinge jääb madalaks. Pooljuhtide elektronid lahkuvad kergelt oma energeetilistelt orbitidelt. Vabade elektronide kineetiline energia kasvab võrdeliselt absoluutse temperatuuriga. Temperatuurivahe olemasolu kutsub esile vabade elektronide liikumise. Elektronjuhtivusega pooljuhte nimetatakse n -tüüpi (negatiivset tüüpi) pooljuhtideks. On olemas ka p -tüüpi (positiivset tüüpi) pooljuhid aukjuhtivusmehhanismiga. Aukudeks nimetatakse vabu kohti aatomistruktuuris. Kui näiteks aatomite soojusliikumise tulemusel lahkub elektron, siis tema koht aatomistruktuuris jääb vabaks ja moodustub auk. Vabanenud koha võib elektrivälja toimel täita teine, lähedase kineetilise energia väärtusega elektron, tekitades oma endisele kohale uue augu. Selle elektroni koha võib omakorda täita järgmine, tekitades järgmise augu. Auke võib seega vaadelda positiivsete laengutena, mis suuruselt on võrdsed elektroni laenguga. Elektrivälja toimel lii-



Joon. 69. Termoelemendi skeem: 1 — n -tüüpi pooljuhist haru; 2 — p -tüüpi pooljuhist haru.

guvad pooljuhi vabad elektronid ühes suunas ja augud teises suunas.

Kui pooljuhi materjalile lisada väike kogus (umbes 1%) sobivat lisandit, suureneb vabade elektronide kontsentratsioon mõned miljonid'korrad. Niisama palju kordi suureneb pooljuhtide elektri-juhtivus.

Kui termoelemendi (joon. 69) vooluring sulgeda välistakistusega R , tekib sellises suletud ahelas vool

$$I = \frac{E}{R + R_0},$$

kus R_0 on termoelemendi sisetakistus.

Voolu suund oleneb termopaari harude materjalide omadustest. n -tüüpi harudes on vool suunatud kuumjootekohast temperatuuriga T_1 külmjootekohale temperatuuriga T_2 . p -tüüpi harudes on voolu suund vastupidine.

Üldine suletud ahela elektromotoorjõud (emj.) võrdub mõlema emj. suurusega:

$$E = (a_1 + a_2)(T_1 - T_2).$$

Kui termoelemendi mõlemad harud on valmistatud sama tüüpi pooljuhtidest (n - või p -tüüpi), siis termoelemendi elektromotoorjõud võrdub tema harude elektromotoorjõudude vahega:

$$E = (a_1 - a_2)(T_1 - T_2).$$

Termoelemendi poolt arendatav elektriline võimsus

$$N = EI = \frac{(a_1 + a_2)^2 (T_1 - T_2)^2}{2R}.$$

Temperatuurivahe hoidmiseks tuleb kuumjootekohale juhtida juurde pidevalt soojust ja külmjootekohta tuleb pidevalt jahutada. Tunduv osa juurdejuhitavast soojusest voolab kasutult harude kuumadest otstest külmadesse soojusjuhtivuse teel. Osa termoelemendis saadud elektrienergiast kulub samuti kasutult harude kuumendamiseks.

Termoelemendi kasutegur

$$\eta = \frac{N}{Q} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \eta_0 = \eta_C \eta_0,$$

kus Q on termoelemendile viidav soojus;

η_C — Carnot' ringprotsessi kasutegur;

η_0 — termoelemendi suhteline termiline kasutegur, mis sõltub termoelemendi harude materjalide soojusjuhtivusest λ ja elektrilisest eritakistusest q (efektiivsustegurist Z).

Termoelementides võib kasutada mitte üksnes tahkeid pooljuhte (näiteks pliiitelluriit, vismuttelluriit), vaid ka vedelaid pooljuhte (vasksulfiid, hõbeindiumtelluriit, vaskraudsulfiit). Vasksulfiid annab elektromotoorjõu $300 \mu\text{V}/\text{deg}$ ja elektrijuhtivusteguri $60\text{--}100 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ temperatuurivahemikus $500\text{--}1200^\circ\text{C}$. Tulekindlasse kesta pandud vedelad pooljuhid võivad tahkete pooljuhtidega võrreldes töötada kõrgematel temperatuuridel. Kaitsekestadega võib osaliselt tõsta ka tahkete pooljuhtide töötemperatuure, kaitstes neid oksüdeerimise ja auramise eest.

Termoelektrigeneraator koosneb rööbiti ja järjestikku ühendatud termoelementidest, soojus- ja elektrisolatsioonist, seadmetest soojuse juurdejuhtimiseks kuumjootekohale ja külmjootekohtade jahutamiseks. USA-s töötatakse välja termoelektrigeneraatorit võimsusega 1 kW töötamiseks temperatuuride intervallis $T_1=1500^\circ\text{K}$ ja $T_2=300^\circ\text{K}$. Selleks on valitud pooljuhid järgmiste näitajatega: $\alpha=200 \mu\text{V}/\text{deg}$, $\rho=10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$, $\lambda=1,6 \cdot 10^{-2} \text{W}/\text{cm} \cdot \text{deg}$, $Z=2,5 \cdot 10^{-3} \text{deg}^{-1}$. Et saada pinget 24 V , tuleb järjestikku ühendada 50 termoelementi sisetakistusega $R_0=0,29 \Omega$.

Termoelementi mõõtmed on seda väiksemad, mida suuremat soojushulka Q saab juhtida kuumjootekoha iga ruutsentimeetri pinnale. Pooljuhtide temperatuurikindlus on erinev. Näiteks sulami BiTe maksimaalne töötemperatuur on 300°C , GeSi — 800°C , CuTeS — 1100°C . Tänapäeval kasutatavate pooljuhtide efektiivsustegur Z ei ületa $2 \cdot 10^{-3} \text{deg}^{-1}$ (näiteks BiTe — Bi₂Se₃). Enamikul materjalidel $Z=(0,5 \dots 1,0) \cdot 10^{-3} \text{deg}^{-1}$. Peetakse võimalikuks, et tulevikus võib saada materjale efektiivsusteguriga $Z=(4 \dots 5) \cdot 10^{-3} \text{deg}^{-1}$.

Kui $Z=2 \cdot 10^{-3} \text{deg}^{-1}$ ja $T_1=500\text{--}1200^\circ\text{C}$, siis termoelektrigeneraatori kasutegur on $0,24\text{--}0,29$. Z väärtusel $4 \cdot 10^{-3} \text{deg}^{-1}$ ja samadel temperatuuridel on võimalik saavutada kasutegurit $0,33\text{--}0,39$.

Temperatuuri T_1 tõstmist (ja järelikult ka η tõstmist) piiravad mitte ainult pooljuhtmaterjalide omadused, vaid ka soojusallikast kuumjootekohtadesse soojust andvate soojuskandjate omadused. Temperatuuridel üle $400\text{--}600^\circ\text{C}$ saab kasutada ainult vedelmetalle ja gaase. Vedelmetallide kasutamine on eelistatavam, sest nad tagavad efektiivsema soojusülekanne ja vajavad väiksemat energiakulu soojuskandja tsirkulatsioonile.

Termoelektrigeneraatorite ekspluatatsioonis võivad ülaltoodud kasuteguri väärtused väheneda termoelementide harude materjalide omaduste muutumise tagajärjel. Käesoleval ajal kasutatakse kolme termoelementide ühendamisviisi: pressimine, metallurgiline meetod (jootmine, keevitamine, vedela metalliga ülevaalamine) ja vedelmetalli-kontakt. Kõik kolm moodust tagavad kasutusea üle $10\,000 \text{ h}$.

Pooljuhtide ja neid ühendavate materjalide termilise paisumise

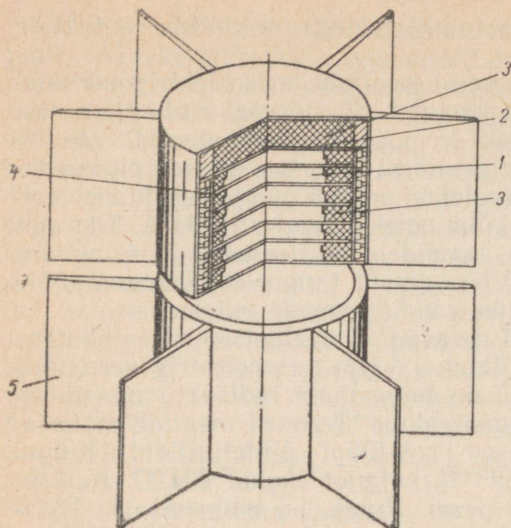
tegurid peavad olema lähedaste väärtustega, et vältida kontaktide pragunemist.

NSV Liidus kasutati esimesi pooljuht-termoelektrigeneraatoreid juba Suure Isamaasõja aastatel. Sõjajärgsel ajal hakati seriiviisiliselt tootma pooljuht-termoelektrigeneraatoreid radiovastuvõtjate toitmiseks elektriliinidest kaugel asuvates piirkondades. Soojuseallikaks on petrooleumilamp. Kuumjootekohtade temperatuur on 300—400 °C ja külmjootekohtadel alla 60 °C. Üks osa patareist annab vastuvõtja lampidele küttevoolu ja teine osa anoodpinget umbes 100 V. Võimsamaid termoelektrigeneraatoreid kasutatakse põllumajanduslike radiojaamade toiteks.

Termoelektrigeneraatorid leiavad kasutamist toiteallikatena kosmoselaevadel. USA-s töötatakse välja termoelektrigeneraatorit SNAP-3, milles on soojusallikaks polooniumi radioaktiivne isotoop (Po-210), tulevikus aga tuumareaktor. Termoelementide materjaliks on selles generaatoris *p*- ja *n*-tüüpi pliitelluriidid. Kuumjootekohta temperatuur on 593 °C, külmjootekohal 204 °C. Kasutatud on 27 termoelementide paari. Pinge on maksimaalse kasuteguri juures 3 V, võimsus 5 W, keskmine kasutegur 5%. Soojusallika soojusvõimsus (Po-210) on tööperioodi alguses 96 W ja 138 ööpäeva pärast 48 W. Kallist polooniumi kavatsetakse asendada reaktori jääksaadusega — tseesiumiga 124, mis on odavam. Termoelektrigeneraatori kõrgus on 140 mm ja läbimõõt 121 mm. Seadme mass on 2,3 kg.

Firmas «Westinghouse» luuakse eksperimentaalset termoelektrigeneraatorit võimsusega 5 kW ja pingega 10 kuni 120 V, mis annab voolu tugevuse vastavalt 500 kuni 42 A. Generaator koosneb kahest sektsioonist võimsustega 2,5 kW. Sektsioonide läbimõõt ja kõrgus on 562 mm. Silindri seinad on moodustatud patarei termoelementidest. Silindri sees põletatakse petrooleumi. Kuumal küljel on temperatuur 650 °C, külmal küljel 10 °C. Kasutatakse sundtsirkulatsiooniga vesijahutust. Termoelementid on mitmest erineva töötemperatuuride diapasoniga materjalist.

I. V. Kurtšatovi nimelises Aatomienergia Instituudis anti 14. augustil 1964. aastal eksploatatsiooni tuumareaktormuundur «Romaška». See on maailma esimene seade, milles on realiseeritud tuumareaktsioonide energia vahetu muundamine elektrienergiaks pooljuht-termoelementidel töötava termoelektrigeneraatori abil. Öönsasse silindrisse berülliumpeegeldisse on paigutatud 11 grafiitkassetti uraandikarbiidist plaadikujuliste soojust eraldavate elementidega. Reaktori aktiivtsooni tsentris on temperatuur 1770 °C ja reaktori välispinnal 1000 °C. Sellele pinnale on kinnitatud räni-germaanium-termoelementide kuumjootekohad, mis võtavad soojust tuumareaktorilt soojusjuhtivuse teel. Mõni tuhat räni-germaaniumvarrast tekitavad voolu 88 A. Reaktormuunduri elektriline võimsus on 500 W. Reaktori tööd juhitakse nelja kuumus-



Joon. 70. Termoelektriline tuumageneraator SNAP-10: 1 — uraanist-235 ja tsirkooniumhüdriidist plaadid; 2 — berülliumist peegeldi; 3 — berülliumist plaadid; 4 — termoelemendid; 5 — radiaatorkiirgaja

kindlast terasest kestas berülliumvardaga, mis asuvad radiaalses peegeldis, ja samuti ka liikuva otspeegeldi abil.

Joonisel 70 on näidatud USA-s väljatöötatava tuumaenergiat kasutava termoelektrigeneraatori SNAP-10 ehitus. Generaatori võimsus on 250 W ja pinge 28 V. 768 termoelementi on paigutatud 32 gruppi à 24 elementi. Reaktori aktiivsoon koosneb ümmargustest plaatidest (nendes kütuseks on U-235 ja aeglustiks tsirkooniumhüdriid), mis on eraldatud üksteisest berülliumplaatidega. Berülliumi kasutamisel aeglustina võib tõsta töötemperatuuri, mille tulemusena võimsus suureneb mitmekordselt. Reaktori kõrgus on 230 mm ja läbimõõt 300 mm. Reaktor on jagatud kaheks pooleks (alakriitilised massid), millede lähendamisel teineteisele tekib ahelreaktsioon. Termoelemendid on eraldatud kandekonstruksioonist elektriisolatsiooni kihiga. Termoelementide vahel on soojusisolatsioon, mis vähendab soojuskadusid.

p- ja *n*-tüüpi pooljuhtidest termoelemendid on ühendatud kuumal poolel terasplaatidega ja külmal poolel vaskplaatidega. Elektrilise ja soojusliku kontakti tagamiseks külmal poolel kasutatakse vedrusid, mis on joodetud vaskplaatide külge. Katsetel on saadud võimsust 260 W kuumjootekohtade temperatuuril 614 °C ja külmootekohtade temperatuuril 344 °C. Termoelektrigeneraatori mass koos radiaatoriga on umbes 113 kg.

Töötatakse välja termoelektrigeneraatoreid, milles soojus juhitakse tuumareaktorist generaatorile reaktoriseadme esimeses kontuuris tsirkuleerivate vedelmetall-soojuskandjatega.

Kavatsetakse termoelemendi ühe haruna kasutada uraankar-

biidi. Potentsiaalide vahe 1 V saamiseks on vaja kuumjootekoha temperatuuri 1000 °C. Temperatuuril 2000 °C võib vool küündida uraankarbiidi pinnal kuni 50–60 A/cm² pingel 2 V. See tagab elektrilise võimsuse üle 750 W termoelektrigeneraatori pinna 1 cm² kohta. Teise haru materjaliks võib olla näiteks tseesiumi aur.

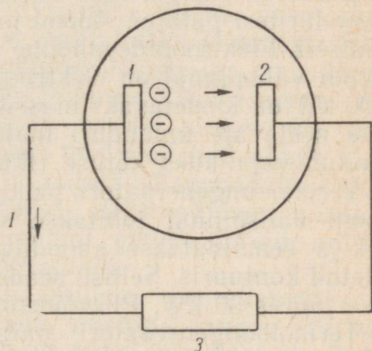
Kui termoelektrigeneraatorite võimsused tõusevad 1000–5000 kW-ni kasuteguri juures 15–20% ja ka seadme maksumus 1 kW kohta osutub vastuvõetavaks, siis leiavad nad laia kasutamist nii väikese võimsusega statsionaarsetes energeetilistes seadmetes kui ka laevajõuseadmetes.

Lähemal perioodil oodatavate võimsuste juures, mis on 100–300 kW piires, ja kasutegurite väärtustel 10–15% võib termoelektrigeneraatoreid kasutada abiseadmetena ja pardareserv-seadmetena.

2. TERMOEMISSION-ELEKTRIGENERAATORID

Termoioongeneraatorid on üheks kontaktita termoemissioon-elektrigeneraatorite eriliigiks. Nende muundurite teiseks eriliigiks on termoelektronigeneraatorid, mis põhinevad elektronide emissiooni kasutamisel, s. t. metallide omadusel kiirata pinnalt elektrone nende kuumutamisel kõrge temperatuurini.

Termoioonmuunduri (diodi) skeem on näidatud joonisel 71. See on alalisvoolugeneraator, milles toimub soojuse vahetu muundumine elektrienergiaks. Kõrge temperatuurini (1200–2000 °C) kuumutatud katood kiirgab välja anoodile liikuvaid elektrone. Mõlemad elektroodid on ühendatud välistakistiga (koormusega). Soojus juhitakse katoodile kõrgel temperatuuril, anoodilt ära aga madalamal temperatuuril. Ruum katoodi ja anoodi vahel on täidetud gaasiga või metalli (näiteks tseesiumi) auruga madalal rõhul. Ioniseeritud aurud kannavad üle elektrilaenguid. Sellist seadet nimetatakse termoioonmuunduriks või gaasitäidisega diodiks. Vaakuumdiodides kantakse elektrilaengud üle elektronide voo-



Joon. 71. Termoioonmuunduri skeem:
1 — kuum katood; 2 — külm anood;
3 — välistakistus.

luga. Seetõttu nimetatakse vaakuumdiodi termoelektronmuunduriks. Vaakuumdiodides peavad elektroodide vahekaugused olema väga väikesed — 0,05—0,015 mm, mis on tehniliselt raskesti teostatav. Gaasitäidisega diodides on lubatavad elektroodide vahekaugused üle 1 mm.

Elektronide emissiooni nähtuse avastas Edison hõõglampide katsetamisel. Thomson tegi kindlaks, et termoelektronemissiooni puhul toimub elektrilaengute ülekanne läbi vaakuumi elektronidega.

Termoelektrigeneraatoris läheb märgatav osa juurdejuhitud soojusest kaotsi soojusjuhtivuse tõttu kuumalt kontaktilt külmale. Termoemissioongeneraatoris saab soojus katoodilt anoodile kanduda ainult kiirguse teel ja see soojuskadu ei ole suur. Suurem energiakadu on seotud ruumilaengu tekkimisega elektroodide vahele elektronidest, mis ei jõua anoodile. Termoioonmuundurid kombineeruvad hästi tuumareaktorite soojust eraldavate elementidega ja samuti ka isotoopenergiaallikatega. Seejuures võib ruumilaengu neutraliseerida tuumaenergia allika γ -kiirgusega. See tõstab soojuse elektrienergiaks muundamise kasutegurit.

Termoioongeneraatoreid saab kasutada kombineeritult auru- turbiin- ja gaasiturbiinseadmetega, mille tulemusena seadme üldine kasutegur tõuseb 50—60% -ni. Ka on neid võimalik kasutada kombineeritult termoelektrigeneraatoritega, kusjuures esimene töötab kõrgete temperatuuride piirkonnas, teine aga madalate temperatuuride piirkonnas. Tuumaseadmetes võivad termoioongeneraatorid paikneda kas otseses ühenduses soojust eraldavate elementidega, aktiivsooni välispinnal või ka väljaspool aktiivsooni (näiteks soojusvahetis).

On välja töötatud reaktori soojust eraldavate elementidega ühendatud termoioonelementide konstruktsioon. Aktiivsooni kanalid on kujundatud õhukeseseinalistest torudest, mille sisse on paigutatud muundurid. Vardakujulised soojust eraldavad elemendid on paigutatud muunduri katoodina töötavasse kesta. Kütuse ja kesta vahel on pilu. Iga muunduri katood on ühendatud järgmise muunduri anoodiga. Igas kanalis on niisiis järjestikku ühendatud muunduritest patareid. Anood paikneb nendes katoodi suhtes koaksiaalselt. Elektroodidevaheline ruum on täidetud tseesiumi auruga. Diodi välispinnal on elektriisolatsioon. Seadme võimsuse juures 1000 kW on loodetavaks massiks 1,76 kg/kW. Seoses aeglasi neutronneelavate muunduri materjalide olemasoluga aktiivsoonis muutub vajalikuks kütuse rikastamine.

Termoioongeneraatori paiknemisel reaktori sfäärilise aktiivsooni välispinnal juhitakse soojus katoodidele soojusjuhtivuse teel ja eemaldatakse anoodilt soojuskandjaga, mis tsirkuleerib suletud kontuuris. Sellise seadme mass on umbes 25 kg/kW võimsuse juures 30 kW. Piirvõimsuseks on mõnisada kilovatti.

Termoioongeneraatori paigutamisel väljapoole aktiivsooni

juhitakse soojust katoodidele vedelmetallist soojuskandjaga. Et tagada katoodi temperatuuri üle 1200 °C, on soovitatav kasutada kõrge keemistemperatuuriga metalle, et vältida kõrget rõhku reaktori tsirkulatsioonikontuuris ja muundurites. Võimalik on näiteks kasutada liitiumi, mille keemistemperatuur on 1337 °C.

USA firmas «General Electric» töötatakse välja termioionmuunduri kiiretel neutronitel töötavat reaktorit. Kütuseks on UO₂; soojust eraldavate elementide kest on volframist. Katsetel saavutati generaatori väljundvõimsuseks 10 W/cm², tööiga 5000 h ja kasutegur kuni 17%.

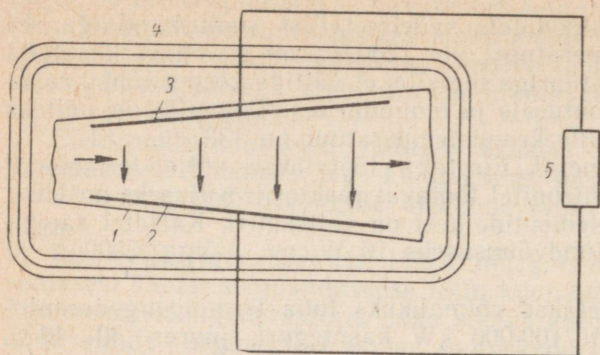
Aastaks 1980 peetakse võimalikuks luua termioiongeneraatorid võimsusega kuni 100 000 kW kasuteguri, juures 30–40%. Kasutegur võib ulatuda 50–60%-ni, kui kombineerida seadet auruturbiiniga. Selliste suure võimsusega kombineeritud seadmete võimalike mõõtmete ja massi kohta puuduvad seni veel andmed. Isegi siis, kui lähtuda suhteliselt väikese võimsusega termioiongeneraatorite andmetest, võib ikkagi eeldada, et tavalise tuumaseadme gabariitidesse võiks paigutada 1,5–2 korda võimsama kombineeritud tuuma-termioionseadme. Kombineeritud seadme kõrgema kasuteguri tõttu väheneb vastavalt vajalik tuumakütuse kogus või pikeneb tuumareaktori töötsükli kestus.

3. MAGNETHÜDRODÜNAAMILISED GENERAATORID

Magnethüdrodünaamilisi generaatoreid võib nimetada termoelektromagnetilisteks. Nende töötamine põhineb elektrit juhtiva gaasi või vedeliku ja magnetvälja vastastikusel toimel. See vastastikune toime leidis algul praktilist kasutamist pöördtsükli — elektromagnetilise pumba tsükli, kus magnetvälja mõjul tekitatakse vedelmetallis rõhk.

Välja on töötatud elektrodidega (konduktiivsed) ja elektroodideta (induktiivsed) magnethüdrodünaamilised generaatorid. Elektrodidega generaatoris saadakse vool elektrodidelt, mis asuvad temperatuuriga kuni 3000 °C plasma voolus, teises tüübis indutseeritakse vool mähises, mis ei puutu kokku plasmaga. Elektrodidega generaatoritel on rida puudusi. Nende iga on määratud kõrgel temperatuuril töötavate elektrodide kasutusajaga. Seda tüüpi generaatorites ei ole võimalik saada pinget üle mõne tuhande voldi. Tavalise skeemi puhul toodavad nad ainult alalisvoolu ja vahelduvvoolu saamiseks on vajalikud spetsiaalsed muundurid. Praegusel ajal projekteeritakse elektrodidega vahelduvvoolugeneraatoreid ja samuti keeristüüpi generaatoreid, milledes nimetatud puudused loodetakse kõrvaldada.

Elektroodideta magnethüdrodünaamilistes generaatorites toodetakse kõrgepingelist vahelduvvoolu, mistõttu langeb ära vajadus muundurite ja trafode järele. Seda tüüpi generaatori võimsus



Joon. 72. Magnethüdrodünaamilise generaatori skeem: 1 — düüs; 2 — katood; 3 — anood; 4 — magnetvälja tekitav kest; 5 — elektriline koormus.

ei ole konstruktiivselt piiratud ja võib ulatuda kümnete miljonite kilovattideni. Selle tüübi praktilist väljatootamist takistavad aga konstruktsiooni keerukus ja tööprotsessi füüsikalise külje mitteküllaldane tundmine. Edukamalt on senini arenenud elektroodidega generaatorite konstruktsioonid. Elektroodidega alalisvoolu-generaatori põhimõtteskeem on joonisel 72. Düüsi telje suunas liikuv elektrit juhtiv vedelik löikab magnetvälja jõujooni. Magnetvälja mõjul tekib vedelikus elektromotoorjõud, mille suund on risti vedeliku kiirusega ja magnetväljaga. Kui ühendada elektroodid suletud välisahelaga, siis saadakse selles alalisvool. Muunduri abil võib sellest saada vahelduvvoolu.

Elektrit juhtiva vedelikuna kasutatakse magnethüdrodünaamilistes generaatorites tavaliselt nõrgalt ioniseeritud gaasi (heeliumi, argooni), millele on lisatud kergelt ioniseeruvat metalli (tseesium, kaalium).

Magnethüdrodünaamilise generaatori kanali mahuühikust võib saada võimsust

$$N = \frac{H^2 \omega^2 10^{-6}}{\rho(1+\alpha)} \text{ W/cm}^3,$$

kus H on magnetvälja tugevus G,

ω — vedeliku kiirus cm/s;

ρ — vedeliku eritakistus Ω cm;

α — välis- ja siseahelate takistuste suhe.

Elektrivälja tugevus

$$\frac{U}{d} = HU \cdot 10^{-8} \text{ V/cm},$$

kus d on elektroodidevaheline kaugus cm;

U — potentsiaalide vahe V.

Juhtiva vedeliku liikumisel kiirusega 10^5 cm/s magnetväljas tugevusega 10 kG indutseeritakse elektriväli tugevusega 10 V/cm.

Gaas muutub elektrit juhtivaks temperatuuril umbes 3000 °K. Leelismetallide lisand 1—1,5% tõstab aga järsult gaasi ionisatsiooni. Ionisatsioonipotentsiaal on tseesiumil 3,82 eV, kaaliumil 4,32 eV, naatriumil 5,10 eV ja baariumil 5,19 eV. Kõige sagedamini kasutatakse kaaliumi tema odavuse tõttu.

Tugevate magnetväljade tekitamiseks kanali suunas kasutatakse ülijuhtivaid magneteid. Nendes magnetites võib mitmekihiline mähis olla valmistatud niobiumvask- või niobiumtsirkooniumtraadist ja ta töötab temperatuuril, mis on lähedane vedela heeliumi temperatuurile. Selle temperatuuri hoidmiseks kulub umbes 1% generaatori väljundvõimsusest.

Generaatori düüs on suurte mõõtmetega. Projekti kohaselt on 315-MW võimsusega generaatori düüsi sisenemisristlõige $0,843 \times 0,843$ m ja väljumisristlõige $0,84 \times 1,45$ m ning düüsi pikkus on 27 m. Need mõõtmed vastavad heeliumi voolule $0,157 \cdot 10^3$ kg/s kiirusel 1775 m/s, rõhu langemisel 4,56-lt kuni 1,95 ata ja temperatuuri muutumisel vastavalt 1613—1227 °K.

Tavalise sirge düüsi asemel on võimalik ka tigukanali kasutamine, millesse gaas juhatakse tangentsiaalselt ja kus ta liigub järgnevalt spiraalikujulist trajektoori mööda. Sellises pööristüüpi generaatoris läbib gaasi vool pika tee väikese kanali pinna juures, mistõttu vähenevad soojus- ja hõõrdekaod. Väheneb ka võimsuse kulu välise magnetvälja moodustamiseks.

Magnethüdrodünaamilise generaatori elektriline kasutegur

$$\eta_{el} = \frac{E}{\omega B},$$

kus E on elektrivälja tugevus;

ω — gaasi kiirus;

B — magnetvoo tihedus.

Elektrilise kasuteguri optimaalseks väärtuseks on $\eta_{el} = 0,8 \dots 0,9$.

Magnethüdrodünaamilise generaatori sisemine kasutegur on sellest, kui palju gaasi rõhk langeb, ja gaasi termodünaamilistest omadustest (erisoojuste suhe jääval rõhul ja jääval mahul).

Temperatuuri saamiseks magnethüdrodünaamilise generaatori düüsi ees umbes 2500 °C või rohkem on vaja kütuse põletamiseks antavat õhku soojendada kõrge temperatuurini — umbes 1500 °C. Nii kõrge temperatuuriga õhuelsoojendi loomine osutub keeruliseks tehniliseks probleemiks, mida käesoleva ajani pole suudetud lahendada. Toru- või plaattüüpi küttepinde jaoks puuduvad sobivad tulekindlad materjalid. Kontaktprintsibiil töötavates soojusvahetites lihtsustaks puistematerjalide või vedelmetallide kasutamine materjalide tulekindluse probleemi lahendamist, ent kutsub esile teisi raskusi (vedela metalli piiskade väljakandumine ja

sadestumine, puistematerjalide etteandemehhanismide vähene töökindlus jt.).

Hapniku lisandamine õhule võimaldab alandada õhu eelsoojendustemperatuuri 600—700 °C võrra, ent nõuab täiendavaid kapitalimahutusi ja eksploatatsioonikulusid seoses hapnikuseadmega.

Magnethüdrodünaamiliste generaatoritega tuumaseadmetes võib gaasi temperatuur düüsi ees olla madalam, sest gaasi elektri juhtivus suureneb aatomite jagunemissaaduste ioniseeriva toime tõttu.

Keeruliseks osutub magnethüdrodünaamilise generaatori kõrgetemperatuuriliste elementide materjalide probleem. Magneti poolused (generaatori kanali kaks vastasseina) peavad olema valmistatud dielektrikust ja kaks ülejäänud sein (elektroodid) elektrit juhtivast materjalist. Dielektrikutena võib kasutada oksiide (MgO jt.), mõningaid nitriide, tsirkooniumisulameid. Elektroodide võimalikeks materjalideks on raskelt sulavad metallid (volfram, volframi ja tantaali sulam), nitriidid, boriidid, karbiidid ja grafiit.

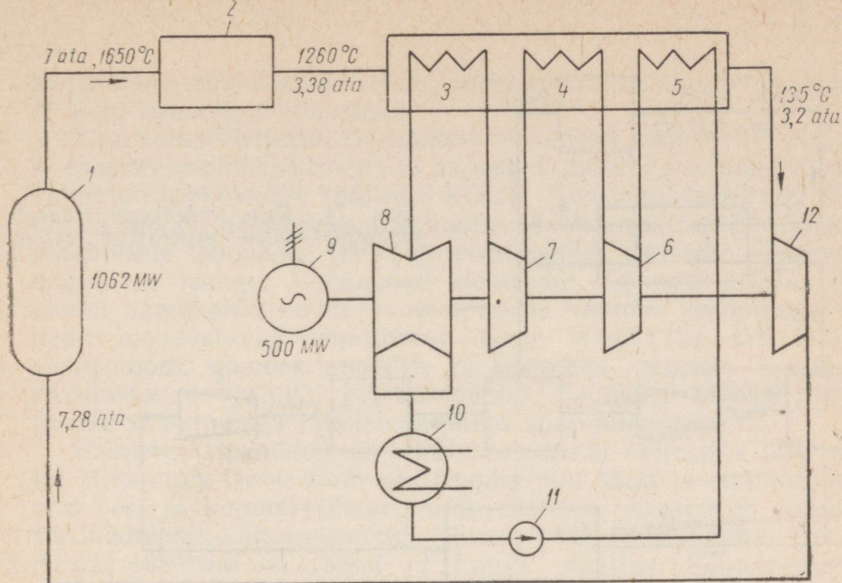
Praegusel ajal on tööd magnethüdrodünaamilise generaatori loomiseks eksperimentaalsete uurimiste staadiumis. USA-s on loodud eksperimentaalsed generaatorid võimsustega 1—200 kW, kusjuures gaasi kuumutatakse petrooleumi või bensiini põletamisega põlemiskambris või elektriliselt.

Eksperimentaalseid magnethüdrodünaamilisi generaatoreid on loodud ka NSV Liidus, Poolas, Inglismaal ja Saksa FV-s.

Välja on töötatud rida projekte magnethüdrodünaamilise generaatori rakendamiseks koos kuni 500-MW auruturbiinidega, kusjuures kütuseks on kivisüsi või nafta. Seadme üldise kasuteguri väärtuseks hinnatakse kuni 45—50%. Seadme maksumus võimsuse 1 kW kohta enamiku projektide alusel on suurem kui auruturbiinidega elektrijaamal. Puuduseks on ka suur vase kulu.

USA-s on projekteeritud tuumaseade magnethüdrodünaamilise generaatori ja auruturbiiniga, mille üldvõimsus on 500 MW. Selle seadme soojusskeem on joonisel 73. Reaktori soojusvõimsus on 1062 MW, magnethüdrodünaamilise generaatori võimsus 315,5 MW ja auruturbiini võimsus 400 MW. Üldine elektriline brutovõimsus on 715,5 MW. Sellest võimsusest kulutatakse generaatori abimehhanismide käitamiseks 16,5 MW, teiste abimehhanismide käitamiseks 30,6 MW ja kompressori käitamiseks 168,4 MW. Seadme üldine kasulik võimsus (netovõimsus) on 500 MW ja kasutegur 47,1%.

Reaktori aktiivsooni läbimõõt on 7 m ja kõrgus 7 m. Läbi aktiivsooni tsirkuleerub heelium kiirusega 120 m/s ja temperatuuril reaktori ees 340 °C ning reaktori järel 1650 °C. Generaatori kanali pikkus on 27 m ja väljumisristlõike pindala $0,8 \times 1,42$ m. Düüsi ees on heeliumi rõhk 4,6 ata, temperatuur 955 °C ja kiirus 1746 m/s. Düüsi järel on rõhk 1,96 ata ja temperatuur 135 °C.



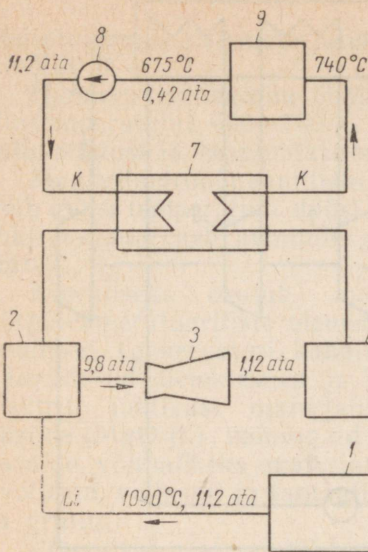
Joon. 73. Magnethüdrodünaamilise generaatoriga ja auruturbiiniga 500-MW tuumaseadme soojusskeem: 1 — reaktor; 2 — magnethüdrodünaamiline generaator; 3 — teine auruvahelekuumendi; 4 — esimene auruvahelekuumendi; 5 — aurugeneraator; 6 — turbiini kõrgrõhusilinder; 7 — turbiini keskrõhusilinder; 8 — madalrõhusilinder; 9 — elektrigeneraator; 10 — kondensaator; 11 — toitepump; 12 — kompressor.

Praegusel ajal puuduvad soojust eraldavad elemendid, mis tagaksid kaaliumi kuumutamise reaktoris temperatuurini 1650 °C.

D. Elliot soovitas kahe vedelikuga magnethüdrodünaamilise generaatori tsükli (joon. 74). Selles tsükli kasutatakse plasma asemel juhtiva vedelikuna vedelmetalli — liitiumi.

Vedel liitium saabub temperatuuril umbes 1100 °C reaktorist 1 segajasse 2, kuhu samuti saabub kondensaatorist 9 (pumbatakse pumbaga 8) eelnevalt soojusvahetis 7 soojendatud vedel kaalium. Viimane aurustub osaliselt, sattudes kontakti segajas oleva liitiumiga ja tekkiva auru ja vedeliku segu läheb düüsi 3. Düüsis aurustub täiendav kogus kaaliumi rõhu langemise tulemusel. Kaaliumi aur eraldatakse separaatoris 4 ja läheb kondensaatorisse 9. Vedel liitium läbib generaatori kanali 5, genereerides elektrienergiat, ja antakse seejärel pumbaga 6 reaktorisse. Soojusvaheti 7 on ringprotsessi kasuteguri tõstmiseks. Sellist tüüpi generaatoreid peetakse sobivateks kasutada laevajõuseadmetena.

Sellise skeemi realiseerimine on võimalik ka ainult ühe vedelikuga (näiteks ainult liitiumiga). Sel juhul teeks generaatori kanalis tööd vedel liitium ja soojust annaks kondensaatoris ära liitiumi aur.



Joon. 74. Kahe vedelikuga magnet-hüdrodünaamilise generaatori skeem.

USA spetsialistid oletavad, et aastaks 1980 saavutatakse magnet-hüdrodünaamilise generaatori ühikvõimsuseks 750 MW kasuteguri juures 55—60%. Föderaalse Energeetikakomisjoni prognooside kohaselt saavutab aastaks 1980 selliste generaatorite võimsus 2—5% üldisest elektrijaamade käikulastavast võimsusest.

Kui lähtuda prognoosidest, et magnet-hüdrodünaamiliste generaatorite erivõimsus viiakse väärtuseni 200—500 MW/m³, siis võib eeldada, et nende generaatorite ja auru- või gaasiturbiinidega tuumaenergiaseadmed omavad tulevikus märksa väiksemat massi ja gabariite, võrreldes sama võimsusega tavaliste tuumaenergeetiliste turbiinseadmetega.

4. KEEMILISED ELEKTRIGENERAATORID (KÜTUSEELEMENTID)

Kütuse keemilise energia vahetu muundamine elektrienergiaks on teostatav keemilistes elektrigeneraatorites — kütuseelementide patareides.

Kütuseelementides toimub kütuse elektrokeemiline või «külm põlemine», kusjuures kütuse keemiline energia muundatakse vahetult elektrivooluks, ilma vahepeal soojuseks muundamata. Seetõttu ei piira kütuse keemilise energia üleminekut elektriliseks Carnot' termodünaamilise ringprotsessi tingimused ja sellise protsessi teoreetiline kasutegur võib suhteliselt mõõdukatel temperatuuridel ulatuda 90%-ni. Kütuseelementides puuduvad sellised

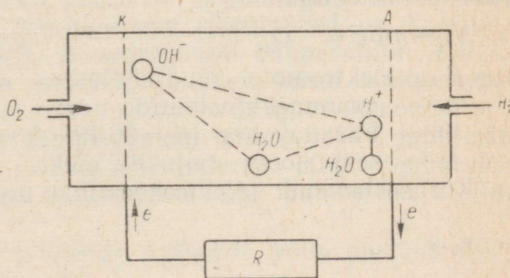
kaod, nagu soojuskaod katlas, turbiinis ja generaatoris, samuti ei sõltu kasutegur võimsusest.

Üks kütuseelemendi skeemidest on toodud joonisel 75. Katoodi K (poorne hapnik-elektrood) ja anoodi A (poorne vesinikelektrood) vahel on elektrolüüt (näiteks KOH). Vesiniku molekulid lagunevad anoodil aatomiteks, kus kaotavad oma elektronid ja lähevad positiivsete ioonidena (H^+) üle elektrolüüti, tekitades elektroodis negatiivse laengu. Vabanenud elektronid liiguvad mööda välis-ahelat hapnik-elektroodile (katoodile) ja hapniku aatomitega ühinedes moodustavad negatiivsed ioonid. Radikaalid OH läbivad elektrolüüdi, liikudes anoodile ja ühinedes vesiniku ioonidega, moodustavad vesiniku põlemissaaduse — vee. Elektroodid on poorse struktuuriga reaktsioonipinna suurendamiseks.

Esimese (süsinikhapnik-) kütuseelemendi valmistas 1802. aastal Humphrey Davy. Selle elektroodid olid söest ja elektrolüüdiks olid vesi ja lämmastikhape, mida eraldas teineteisest vahesein. Vesinikhapnik-kütuseelemendi ehitas 1839. a. William Groove. Aastal 1889 uurisid Mond ja Lange plaatina katalüsaatoriga vesinikhapnik-kütuseelementi (happega immutatud keraamika). Aastatel 1890 kuni 1940 ehitas ja uuris mitut tüüpi kütuseelemente E. Baur oma kaastöötajatega. Bauri süsielementides oli anood koksist või elektroodisöest, katood vasest, raudoksiidist jne., ja elektrolüüdiks sulanud soolade (booraks, sooda), leelissilikaatide ja kreoliidi segud. Oksüdeerijana kasutati õhku. Süsikutuseelemente uuris ka K. Justi (Saksa FV).

NSV Liidus avaldasid kütuseelementide põhjalike uurimiste tulemused P. M. Spiridonov (1941) ja O. K. Davtjan (1947). Spiridonovi vesinikhapnik-kütuseelemendi kasutegur küündis väärtuseni 60%. 30-st elemendist koostatud patarei andis voolu 1,5 A pingel 4,5 V. Davtjani uurimised haaravad kütuseelementide teooria üldküsimusi, vesinikhapnik-elementide väljatöötamist, tahke gaasi elemente jne. Nende tööde tulemusi kasutatakse ka välismaal, näiteks Baconi (Inglismaa) ja Gorini (USA) vesinikhapnik-kütuseelementides. Davtjani õhkdepolarisatsiooniga süsinikoksiid-elemendi kasutegur oli 58%.

T. Bacon koostas kõrgel rõhul töötava 40-st vesinikhapnik-elemendist patarei võimsusega 5 kW. USA-s ehitasid G. Irving



Joon. 75. Vesinikhapnik-kütuseelemendi skeem.

ja tema kaastöötajad 1959. a. kütuseelementide patareid võimsusega 20 hj kasutamiseks traktorimootorina, mis tekitas tõmbejõu 1350 kG. Selle mootoriga traktor tegi katsed edukalt läbi.

Põletatava kütuse järgi liigitatakse kütuseelemendid kolme klassi: tahkekütuse (süsi, metallid) elemendid, vedelkütuse (piiritus) elemendid ja gaaskütuse (vesinik) elemendid. Metallilise kütusega kütuseelemendid on ammu tuntud galvaanielementidena.

Elektrolüüdi järgi jagunevad kütuseelemendid samuti kolme klassi: vesielektrolüüdiga (hapete ja aluste lahused), sulatatud elektrolüütidega (silikaatide ja karbonaatide segud) ja tahkete elektrolüütidega (tahkete karbonaatide ja oksiidide, näiteks tsirkooniumoksiidide segud).

Vesielektrolüütidega elemendid (madalrõhulised vesinikhapnik-elemendid) kuuluvad madalatemperatuuriliste (alla 100 °C) elementide klassi. Keskmistemperatuuriliste klassi kuuluvad kõrgrõhulised vesinikhapnikelemendid, mis töötavad temperatuuril 200—300 °C. Kõrgetemperatuurilistes elementides (500—700 °C) kasutatakse elektrolüüdina sulatatud sooli. Temperatuuridel üle 900—1000 °C hakkab langema kütuseelemendi kasutegur.

Tahke kütusega elemendid kuuluvad kuluva elektrolüüdiga elementide gruppi, gaas- ja vedelkütusega elemendid aga mitte-kuluva elektrolüüdiga elementide gruppi. Tehakse vahet ka tagastatavate (näiteks vesinikhapnik-) ja tagastamatute (näiteks süsinikhapnik-) elementide vahel.

Kütuseelemendi teoreetiline elektromotoorjõud oleneb tema tüübist (temas toimuvast reaktsioonist). Atmosfäärirõhul ja toatemperatuuril on elektromotoorjõud järgmine:

Flektromotoorjõud	Reaktsioon
V	
0,70	$2C + O_2 \rightarrow 2CO$
1,02	$C + O_2 \rightarrow CO_2$
1,23	$H_2 + 0,5O_2 \rightarrow H_2O$ (vedelik)
1,33	$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$
1,56	$N_2H_4 + O_2 \rightarrow N_2 + 2H_2O$
3,14	$2Na + H_2O + 0,5O_2 \rightarrow 2NaOH$

Thomsoni tööde alusel avaldub kütuseelemendi elektriline võimsus valemiga

$$N_{el} = n\Phi E = -Q,$$

kus E on elektromotoorjõud ahelas;

n — grammekvivalentide arv;

Φ — Faraday arv ($\Phi = 96\,497 \text{ A} \cdot \text{s/g-ekv}$);

Q — reaktsiooni soojuslik efekt.

Kütuseelemendi (elektrokeemilise protsessi) kasutegur

$$\eta_0 = \frac{N_{el}}{Q}.$$

Temperatuurivahemikus 300—2000 °K on elementide kasutegur lähedane 100%-le ja peaaegu ei sõltu temperatuuri muutumisest.

Vesinikhapnikelemendis väheneb elektromotooriõud temperatuuri tõusmisel. Seetõttu peab see element töötama madalate temperatuuride piirkonnas.

Kütuseelemendi kasutegurit vähendab polarisatsioon. Kontsentratsiooniline polarisatsioon on ionide kontsentratsiooni muutumine elektroodide lähedal, aktivatsiooniline (keemiline) polarisatsioon on tingitud kütuse ja oksüdeerija aktiveerimisprotsesside väikesest kiirusest elektroodide pinnal.

Kütuseelemendi täielik kasutegur

$$\eta = \eta_v \eta_p,$$

kus η_v on voolu kasutegur;

η_p — pinge kasutustegur.

Tegur η_v on kütuseelemendis faktiliselt ajaühikus ülekandunud elektri hulga ja teoreetiliselt võimaliku elektri hulga suhe. Tegur η_p on elemendi klemmpinge ja tema teoreetilise elektromotoorjõu suhe.

Praegusel ajal töötatakse välja vedelmetall- ja galvaanilisi kütuseelemente, milles kasutatakse vedelmetalle või nende ühendeid. USA-s on võrreldud kahe tuumakütusel töötava kosmilise jõuseadme — elavhõbeda auru turbiiniga ja vedelmetall-kütuseelementide patareiga jõuseadmete projekte. Reaktori soojusvõimsusel 53 kW saadi elavhõbeda auru turbogeneraatori võimsuseks 3 kW (kasutegur 5,7%) ja kütuseelementide patareile 5,55 kW (kasutegur 10,5%), kusjuures seadmete massid olid praktiliselt võrdsed (270—280 kg).

Kütuseelementide patarei on koostatud 20 järjestikku ühendatud elemendist. Iga element on valmistatud kahest vedelmetallelektroodist, mida eraldab sulatatud elektrolüüdiga immutatud matriits. Positiivseks elektroodiks on elavhõbe ja negatiivseks kaaliumamalgaam. Kütuseelemendi elektroodidevahelise keemilise reaktsiooni tulemusel tekib elektromotoorjõud, mis sõltub eeskätt amalgaami kontsentratsioonist.

Reaktori jahutuskontuuris tsirkuleerib naatriumi ja kaaliumi sulam, kütuseelementide patarei kontuuris aga elavhõbe ja kaaliumamalgaam, mis ühinevad patareist väljumisel ja suunatakse aurugeneraatorisse. Aurugeneraatorisse sisenemisel on kaaliumi kontsentratsioon umbes 25% ja amalgaami temperatuur 430 °C. Aurugeneraatoris elavhõbe aurustub ja segu läheb tsüklonseparaatorisse, kus aur eraldatakse vedelikust ja järgnevalt kondenseeritakse. Amalgaam antakse temperatuuril umbes 630 °C jahutisse, milles jahtub kuni 300 °C ja kontsentratsioonil 50% pumbatakse elektromagnetilise pumbaga kütuseelementide patareisse. Üldine patarei mass on 74,4 kg.

USA spetsialistide prognooside kohaselt võib aastaks 1980

keemiliste elektrigeneraatorite ühikvõimsus küündida üle 1000 kW ja kasutegur saavutada väärtused 60%. Installeeritud võimsuse 1 kW maksumuse arvatavaks väärtuseks kujuneb 50—100 dollarit (tavalistes väikese võimsusega elektrijaamades on 1 kW maksumus 200—300 dollarit).

LÕPETUSEKS

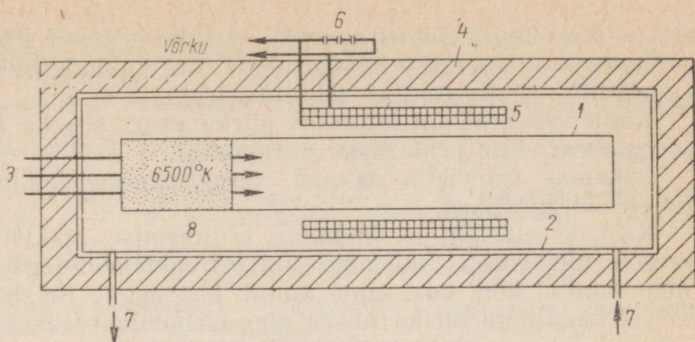
Energiaagregaatide arengu põhisuunaks on nende võimsuse suurendamine ja parameetrite tõstmine, mis toob endaga kaasa kapitalimahutuste, metallikulu, eksploatatsioonipersonali ja kütusekulu suhtelise vähenemise ja põhjustab lõppkokkuvõttes toodava elektrienergia omahinna alanemise.

Seda teed arenevad auruturbiin- ja gaasiturbiinagregaatide konstruktsioonid, hüdroturbiinid, diiselagregaadid ja aatomienergeetilised seadmed.

Uute energiavarude — loodete energia, merelainete energia, tuuleenergia, maa süvasoojuse, vee ja õhu temperatuuride vahe arktilistes ja troopilistes alades ja päikeseenergia rakendamine on samuti seotud auru-, gaasi- ja hüdroturbiinide edasise arenguga või ka kombineeritud seadmete arenguga, milles töötavad samaaegselt nii auru- kui ka gaasiturbiinid.

Nende energiaagregaatide klassikaliste tüüpide arengu kõrval, kus energia muudetakse algul mehaaniliseks ja seejärel elektriliseks, on ilmunud ka masinateta energiaseadmed, kus soojus või keemiline energia muundatakse vahetult elektriliseks ilma vahepealse mehaanilise töö staadiumita. Sellisteks seadmeteks on termoelektrigeneraatorid, termoioongeneraatorid, magnethüdrodünaamilised generaatorid ja keemilised generaatorid. Nagu nähtub nende uute elektrigeneraatorite tüüpide lühikesest ülevaatest, võib neid kõiki kasutada elektrijaamades ainult ühenduses auru- ja gaasiturbiinagregaatidega. Ilma kombineerimiseta auru- ja gaasiturbiinagregaatidega on neil kõigil, välja arvatud kütuseelemendid, vastuvõtmatult madal kasutegur, sest neid saab kasutada ainult kõrgete temperatuuride piirkonnas.

Praegusel ajal tehakse töid uute, masinata tuumaelektrigeneraatorite tüüpide loomiseks. Üheks selliseks on impulssplasmareaktor (joon. 76). Silindrilises korpuses paikneb gaasiline tuumakütus, mille kontsentratsioon on alakriitiline. Kui tõsta silindri vasakus otsas kütuse kontsentratsioon kriitilise väärtuseni, kasutades selleks magnetvälja või mõnda muud moodust, siis algab seal tuumareaktsioon. Selle tulemusel tekib löögilaine ja kõrgetemperatuuriline ioniseeritud gaas (kuum plasma) liigub paremale. Löögilaine tekitab kriitilise kontsentratsiooni paremas silindri otsas ja seal algab uuesti tuumareaktsioon. Iga tuumajagunemise impulsi energia antakse üle võnkeringile, mis koosneb poolist ja kondensaatorpatareist.



Joon. 76. Plasma-tuumareaktor: 1 — sisemine korpus; 2 — väline korpus; 3 — bioloogiline kaitse; 4 — reguleerimisvardad; 5 — vaskmähis; 6 — kondensatorpatareid; 7 — jahutav keskkond; 8 — neutronite peegeldi.

Arvutused näitavad, et sellise reaktori minimaalne võimsus peab olema 500 MW. Muid andmeid: sisemise silindri läbimõõt 4 m ja pikkus 45 m, gaasi temperatuur 6500 °K, korpuse grafiitseinte temperatuur 3500 °K, gaasi rõhk umbes 1 ata, võngete sagedus 20 tsüklit sekundis, termodünaamiline kasutegur 30%, seadme üldine kasutegur 20%. Võimalik on tõsta termodünaamilist kasutegurit kuni 50%-ni ja seadme üldist kasutegurit 35%-ni. Sellise plasmageneraatori skeemi realiseerimise üheks raskuseks on sobiva materjali puudumine silindrilise kere valmistamiseks.

Võrreldamatult kõrgemad temperatuurid peavad olema termotuumaseadmetes. Sünteesireaktsioon toimub temperatuuril 100—200 milj. °C.

Mitte ükski konstruktsioonimaterjal ei pea vastu sellel temperatuuril. Kõrgetemperatuurilist plasmata võib hoida magnetilises «anumas», mis tekitatakse tugeva magnetväljaga. Paisudes magnetkestas teeb kõrgetemperatuuriline plasma tööd, ületades magnetvälja jõudusid ja tema soojusenergia muundub elektrienergiaks.

Termotuumareaktori töövõimelisuse tingimus avaldub kujul

$$H^2\tau > A(1 - \eta_c).$$

Siin H on plasmata ümbritseva magnetvälja tugevus;

τ — plasma kõrgel temperatuuril püsimise aeg;

η_c — Carnot' ringrotsessi kasutegur.

Reaktsiooni puhul deuteeriumiga on tegur $A=10^8$. Kui tsükli algtemperatuur $T_1=200 \cdot 10^6$ °C, siis isegi suhteliselt kõrge lõpptemperatuuri T_2 puhul on suhe T_2/T_1 lähedane nullile ja kasutegur η_c võrdne ühega. Tsükli realiseerimine kasuteguriga 100% nõuab liiga suurt generaatori kambri mahtu. Arvatakse, et tegelikult tsükli kasuteguriks kujuneb umbes 75%.

Termotuumaa-elektrijaama üldine kasutegur kujuneb kõrge-

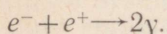
maks teist tüüpi elektriyaamade kasuteguritest. Põhimõtteliselt võib termotuumareaktori tööprotsess olla analoogiline joonisel 76 kujutatud plasmareaktori tööprotsessiga.

Kuna veevarud on looduses piiramatud; siis ka termotuumaaenergia varud on praktiliselt piiramatud.

Lähemas tulevikus asuvad termotuumaa-elektriyaamad oma kohale energeetikas.

Raskete elementide tuumade jagunemise reaktsioonidega ja kergete elementide tuumade sünteesireaktsioonidega ei ole veel ammendatud kõik uus, mida annab kaasaegne füüsika energeetikale. Võimalikud on ka teised aine elementaarosakeste reaktsioonid, mille juures eraldub hiiglaslik kogus energiat.

Tuntud on elementaarosakeste ja antiosakeste annihhilatsioonid (hävimise) reaktsioonid, näiteks elektroni e^- ja ja positroni e^+ puhul:



Selles reaktsioonis positroni ja elektroni paigalseisu massid muunduvad kiirguskvantide energiaks. Osakeste ja antiosakeste annihhilatsioonid reaktsioonides eraldub energia, mis on 100 korda suurem termotuumareaktsiooni energiast ja 1000 korda suurem tuumareaktsiooni energiast. Võimalik, et tulevikus avastatakse annihhilatsioonireaktsioonid, mis leiavad kasutamist elektriyaamades rööbiti tuuma- ja termotuumareaktsioonidega.

KIRJANDUS

1. Алексеев Г. Н. Непосредственное преобразование различных видов энергии в электрическую и механическую. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.
2. Алиханов А. И. и др. Тяжеловодные энергетические реакторы-конвертеры на природном уране с органическим теплоносителем. Женева, 1964.
3. Арцимович Л. А. Исследования по управляемым термоядерным реакциям в СССР, Женева, 1958.
4. Алешенко П. И. и др. Белоярская атомная электростанция. — «Атомная энергия», 1964, Т. 16, в. 6.
5. Белькинд Л. Д. и др. История техники. М., Госэнергоиздат, 1961.
6. Бернштейн Л. Б. Покорение энергии прилива. М., Изд-во «Знание», 1959.
7. Бернштейн Л. Б. Приливные электростанции в перспективной энергетике. М., Госэнергоиздат, 1961.
8. Вейнберг Б. П. Солнце — источник механической и тепловой энергии. М., ГОНТИ, 1934.
9. Гельтман А. Э., Канаев А. А. и Ложкин А. Н. Перспективы использования парогазовых установок. Сб. «Энергетика», М.—Л., Госэнергоиздат, 1957.
10. Гюнтер Г. Через 100 лет. М., Госэнергоиздат, 1933.
11. Давтян О. К. Проблема непосредственного превращения химической энергии топлива в электрическую. М., Изд-во АН СССР, 1947.

12. Доллежалъ Н. А. и др. Развитие энергетических реакторов типа реактора Белоярской АЭС с ядерным перегревом пара. — «Атомная энергия», 1964, Т. 17, в. 5.
13. Жилин В. Г. Компоновки тепловых электростанций. М., Госэнергоиздат, 1961.
14. Жимерин Д. Г. Развитие энергетики СССР. М., Госэнергоиздат, 1960.
15. Золотарев Т. Л. Энергетика будущего. М., Госэнергоиздат, 1948.
16. Иоффе А. Ф. Полупроводниковые термозлементы. М., Изд-во АН СССР, 1962.
17. Канаев А. А. От водяной мельницы до атомного двигателя. М., Машгиз, 1957.
18. Канаев А. А. Атомные энергетические установки. Л., Судпромгиз, 1961.
19. Картошкин М. Д. Топливоподача тепловых электростанций. М., Госэнергоиздат, 1961.
20. Кириллов И. И. Газовые турбины и газотурбинные установки, т. 1, т. 2. М.—Л., Машгиз, 1956.
21. Ковалев Н. Н. Гидротурбины. М.—Л., Машгиз, 1961.
22. Корницкий С. Я. и Рубинштейн Я. М. Общая теплотехника. М., Госэнергоиздат, 1952.
23. Крамеров А. Я. и др. Некоторые пути развития реакторов ВВР. — «Атомная энергия», 1964, Т. 17, в. 6.
24. Кроль Л. Б. Основные особенности котельных агрегатов высокого и сверхкритического давления. М., Госэнергоиздат, 1962.
25. Купцов И. П., и Иоффе Ю. Р. Проектирование и строительство тепловых электростанций. М., Госэнергоиздат, 1962.
26. Лебедев Т. С. и Корниец Д. В. Тепло Земли. М., Изд-во АН УССР, 1963.
27. Лейпунский А. И. и др. Быстрые реакторы с натриевым охлаждением. — «Атомная энергия», 1964, Т. 17, в. 5.
28. Ложкин А. Н. и Канаев А. А. Бинарные установки. М., Машгиз, 1946.
29. Новожилов Ю. В. Элементарные частицы. М.—Л., Физматгиз, 1963.
30. Максимов В. М. Котельные агрегаты большой паропроизводительности. М., Машгиз, 1961.
31. Матвеев Г. А. Энергооборудование атомных электростанций. М., Госатомиздат, 1961.
32. Миллионщиков М. Д. и др. Высокотемпературный реактор-преобразователь «Ромашка». — «Атомная энергия», 1964, Т. 17, в. 5.
33. Морохов И. Д. К новым успехам мирного атома. — «Атомная энергия», 1964, Т. 17, в. 3.
34. Петров П. А. Атомные электростанции. М., Госэнергоиздат, 1961.
35. Петросянц А. М. Третья Международная Женевская конференция атомщиков. — «Атомная энергия», 1964, Т. 17, в. 5.
36. Петросянц А. М. Десятилетие атомной энергетики. — «Атомная энергия», 1964, Т. 16, в. 6.
37. Петунин Б. В. Теплоэнергетика ядерных установок. М., Атомиздат, 1960.
38. Полужкин И. К. и др. Атомная электростанция «Арбус» с органическим теплоносителем и замедлителем. — «Атомная энергия», 1964, Т. 17, в. 6.
39. Синев Н. М., Батуров Б. Б. и Шмелев В. М. О путях развития ядерной энергетики в СССР. — «Атомная энергия», 1964, Т. 17, в. 4.
40. Фельд С. Д. Единый энергетический баланс народного хозяйства. М., Изд-во «Экономика», 1964.
41. Шнеэ Я. И. Газовые турбины. М., Машгиз, 1960.
42. Энергетика мира, М., Изд-во «Энергия», 1964.

SISUKORD

Eessõna	3
Sissejuhatus	5
I peatükk. Auruturbiin-elektrijaamade sisseseade	9
1. Auruturbiini ehituse ja töötamise põhimõtted	9
2. Aurujõuseadme ringprotsessi kasutegur	12
3. Auruturbiini kasutegur	17
4. Kodumaise auruturbiiniehituse arengu mõningad etapid	18
5. Katelagregaadid	23
6. Kondensatsioonielektrijaama seadmestik	30
7. Termofikatsioonielektrijaamade seadmestik	36
8. Milliseks kujunevad auruturbiinidega elektrijaamad tulevikus	38
II peatükk. Gaasiturbiin- ja diiselektrijaamade sisseseade	53
1. Gaasiturbiini ja diiselmootori ehituse ning töötamise põhimõtted	53
2. Gaasiturbiin- ja diiselektrijaamad	59
3. Millised on tuleviku gaasiturbiinid	64
III peatükk. Hüdroelektrijaamade sisseseade	67
1. Hüdroelektrijaamad	67
2. Tõusu-mõõna elektrijaamad	72
3. Laineenergia elektrijaamad	75
IV peatükk. Elektrijaamade kombineeritud protsessiga seadmed	78
1. Auru-gaasijõuseadmed	78
2. Binaarsed seadmed	82
V peatükk. Aatomielektrijaamad	88
1. Tuumareaktsioonid ja tuumaenergia	88
2. Tuumareaktorite ehituse ja töötamise põhimõte	91
3. Aatomielektrijaamade soojusskeemid ja sisseseade	95
4. Aatomielektrijaamade arenguperspektiivid	107
VI peatükk. Geotermiliste, troopiliste, arktiliste, päikese- ja tuule- elektrijaamade sisseseade	114
1. Geotermilised elektrijaamad	114
2. Troopilised elektrijaamad	118
3. Arktilised elektrijaamad	120
4. Päikeseelektrijaamad	121
5. Tuuleelektrijaamad	124
VII peatükk. Soojuse vahetu muundamine elektrienergiaks	131
1. Termoelektrigeneraatorid	131
2. Termoemissioon-elektrigeneraatorid	137
3. Magnethüdrodünaamilised generaatorid	139
4. Keemilised elektrigeneraatorid (kütuseelemendid)	144
Lõpetuseks	148
Kirjandus	150

59 kop

A
29769

3334465

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00333446 5